AHMED S. BOUAZZI

LES MATERIAUX ELECTRIQUES



FONDATION NATIONALE DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
TUNIS

LES MATERIAUX ELECTRIQUES

AHMED SGHAIER BOUAZZI

Maître-Assistant
à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis
Université de Tunis 2
Ancien élève de l'E.S.E.
Docteur-Ingénieur

FONDATION NATIONALE DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
TUNIS
1992

ISBN 9973 - 933 - 00 - 1

PREFACE

Il est difficile de tout écrire sur les matériaux électriques en si peu de pages alors que les industries chimiques et métallurgiques élaborent chaque jour de nouveaux produits dont les propriétés sont de plus en plus intéressantes pour les ingénieurs électriciens.

Ce manuel est destiné aux élèves-ingénieurs du cycle moyen du système tunisien de formation d'ingénieurs d'application. Le cours de matériaux électriques accompagne le cours d'appareillage. Il fait connaître les matériaux utilisés dans les appareils électrotechniques et électroniques, aide à comprendre les raisons des dispositions et des dimensions de ces matériaux, et permet de les choisir soi-même ensuite à bon escient.

Nous présentons ici le minimum de connaissances théoriques permettant de comprendre les propriétés des matériaux et d'acquérir seul un savoir supplémentaire. Nous fournissons une bibliographie à la fin du manuel. Chaque chapitre renferme, à côté des connaissances théoriques et des exercices d'applicaation, des tableaux des propriétés de différents matériaux, rarement rassemblées ailleurs.

Le premier chapitre traite des matériaux conducteurs et assimilés. Il donne un aperçu des propriétés d'un certain nombre de matériaux composites et d'alliages élaborés pour des utilisations diverses, allant de la simple consommation par effet Joule, jusqu'au transport par cryocâbles supraconducteurs, en passant par les thermocouples.

Le deuxième chapitre traite des diélectriques et de leurs propriétés électriques et thermiques. Il donne un aperçu sur la physique qui gouverne l'endurance de ces matériaux. Il donne aussi un certain nombre de définitions entrant dans la manipulation des isolants.

Le troisième chapitre est entièrement consacré aux différentes familles de produits isolants: isolants organiques solides, isolants inorganiques, isolants liquides, isolants gazeux. Pour chaque famille nous avons essayé de donner le maximum de renseignements afin de guider le lecteur et de

l'aider à choisir le produit le mieux adapté à ses besoins et aux conditions d'utilisation et de fonctionnement de son appareillage.

Le quatrième chapitre traite des matériaux magnétiques. A la suite des bases théoriques nécessaires, il donne les propriétés des matériaux ferromagnétiques utilisés dans l'industrie de l'électrotechnique.

Le chapitre cinq fournit les bases théoriques utiles à l'études des matériaux semi-conducteurs, sans donner de détails sur les composants électroniques qui font l'objet d'un cours plus spécialisé.

TABLE DES MATIERES

3

LES DIFFERENTES FAMILLES DE PRODUITS ISOLANTS

4

LES MATERIAUX MAGNETIQUES

5
LES SEMI-CONDUCTEURS

1

Les conducteurs

1.1 Introduction

Les matériaux utilisés en électricité, en électronique et en électrotechnique, sont classés suivant leur aptitude à conduire le courant électrique, c'est-à-dire suivant leur conductivité électrique.

Quand on applique un champ électrique E aux bornes d'un corps quelconque, la densité de courant (de conduction) J_c qui le traverse est proportionnelle au champ:

$$J_c = \sigma E \; ; \qquad (1.1)$$

la constante de proportionnalité σ s'appelle *la conductivité* (unité: $\Omega^{-1}m^{-1}$). Pour les conducteurs, elle est supérieure à 10^5, inférieure à 10^{-5} pour les isolants, tandis que pour les semi-conducteurs elle est de l'ordre de l'unité.

Dans les conducteurs métalliques, la conduction est due aux électrons libres, c'est-à-dire aux électrons qui,

en l'absence de champ électrique, se déplacent dans tout le solide et ne sont pas liés à un atome donné.

Dans un électrolyte, le courant passe grâce aux ions négatifs et aux ions positifs qui se déplacent respectivement dans le sens opposé et dans le même sens que le champ électrique.

Dans les semi-conducteurs purs, la conduction est dite intrinsèque; elle est due à quelques électrons libres de la bande de conduction et à quelques trous libres de la bande de valence. Dans les semi-conducteurs dopés (contenants quelques impuretés), la conductivité dépend du type d'impureté; elle peut être due aux électrons et elle est alors de type *n*; si par contre elle est due aux trous, elle est de type *p*.

1.2 Résistance et résistivité

La résistance électrique d'un conducteur homogène est déterminée par la loi d'Ohm. Elle est égale au rapport V/I, V étant la différence de potentiel à ses bornes et I l'intensité qui le traverse. Si V est exprimé en volts et I en ampères, R est en ohms (Ω).

Pour un conducteur de forme parallélipipédique, la résistance R dépend des faces où est appliquée la différence de potentiel. Pour un conducteur filiforme, R est proportionnelle à la longueur et inversement proportionnelle à la section:

$$R = \rho\, l/S\,; \qquad (1.2)$$

la constante de proportionnalité ρ est l'inverse de la conductivité σ et s'appelle *la résistivité* (Ω-m).

La résistivité d'un conducteur dépend de sa température, de sa pureté et, si c'est un alliage, de sa structure et de sa composition. Dans les conducteurs, la résistivité augmente avec la température et avec le taux d'impuretés; dans les semi-conducteurs, elle varie dans le sens contraire. Certains matériaux dont la résistance varie très brusquement avec la température sont utilisés pour fabriquer des thermistors (Fig. 1.2).

1.3 La résistance d'un point de vue physique

Les électrons de conduction d'un conducteur métallique solide sont dits libres, ils ne sont liés à aucun atome en particulier et ils se déplacent dans tout le solide avec une vitesse aléatoire dont la valeur moyenne, dite *vitesse thermique*, dépend de la température absolue du solide. Les électrons entrent en collision avec les ions et à chaque choc ils perdent la mémoire, c'est-à-dire que ce qui se passe dans l'intervalle de temps séparant deux chocs n'est pas influencé par ce qui s'est passé dans l'intervalle précédent; on dit qu'ils sont animés d'un *mouvement brownien*.

La vitesse thermique, notée v_{th}, dépend de la température du conducteur et elle est très élevée. On peut en déterminer une valeur approchée par la relation d'équivalence entre l'énergie thermique et l'énergie cinétique:

$$1/2\ m v_{th}^2 = 3/2\ kT \qquad (1.3)$$

ou m est la masse de l'électron (9.10^{-31}kg), T la température absolue et k la constante de Boltzmann ($1{,}38.10^{-23}$ J/K).

Exercice: Déterminer la valeur de la vitesse thermique à la température ambiante (300°K)

Réponse: $1{,}1.10^5$ m/s.

En présence d'un champ électrique, un mouvement nouveau s'additionne au mouvement brownien; il est dû à l'accélération imposée par le champ électrique. Cette accélération provient du fait qu'un électron de charge e subit une force $\mathbf{F} = e\mathbf{E}$ s'il est placé dans un champ E. En l'absence de champ électrique (Fig. 1.1 a), le mouvement des électrons étant désordonné et la quantité d'électrons qui passe de droite à gauche pendant l'unité de temps est égale à la quantité qui passe de gauche à droite. En présence d'un champ électrique (b), un mouvement dirigé dans le sens opposé au champ électrique s'additionne au précédent et la quantité d'électrons qui passe de droite à gauche est supérieure à

celle qui passe de gauche à droite, si bien qu'un courant électrique qui passe de gauche à droite.

Notons l la distance moyenne parcourue entre deux chocs grâce à la vitesse thermique (l s'appelle aussi le libre parcours moyen); on peut tirer le temps moyen séparant deux chocs:

$$\tau = l/v_{th} \tag{1.3a}$$

En présence d'un champ électrique extérieur E, le mouvement engendré par la force due au champ, dans le sens contraire du champ, a pour amplitude moyenne:

$$y = ½\, \gamma\tau^2$$

ou

$$y = \frac{1}{2}\frac{eEl^2}{3kT} \tag{1.3b}$$

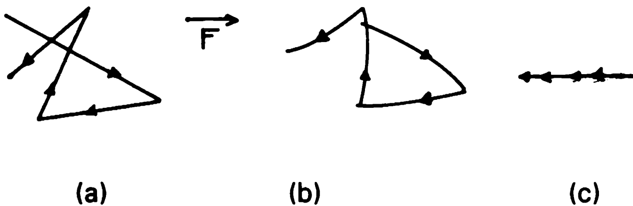


Figure 1.1 (*a*): Mouvement d'un électron dans un solide conducteur. (*b*): Le même mouvement en présence d'un champ électrique. (*c*): Composante d'entraînement due à la présence du champ électrique.

Les électrons qui se déplacent sous l'effet du champ électrique continuent à subir des collisions avec les ions. L'énergie acquise entre deux chocs, grâce à l'accélération due au champ électrique, est perdue à chaque choc. Elle est cédée à l'ion sous forme de vibration du réseau, c'est-à-dire sous forme de chaleur; l'échauffement est appelé *effet Joule*.

Après plusieurs chocs, la distance moyenne parcourue par l'électron, dans le sens contraire du champ, est égale au produit de y par le nombre de chocs et la vitesse

moyenne de déplacement, appelée *vitesse de dérive*, est $v_d = y/\tau$, c'est cette vitesse de dérive qui donne naissance au courant électrique de densité J_c. Les deux grandeurs sont liées par la relation:

$$J_c = nev_d \qquad (1.4)$$

où n est la densité d'électrons de conduction par unité de volume et e la charge de l'électron. on peut déterminer la vitesse de dérive en utilisant la relation $J_c = \sigma E$, ce qui donne:

$$v_d = \frac{\sigma E}{ne} \qquad (1.5)$$

La quantité $\sigma/(ne)$ s'appelle la mobilité μ.

Exercice: Déterminer la valeur de la vitesse de dérive dans un conducteur à la température ambiante (300°K), sachant que le temps séparant deux collisions est de l'ordre de 2.10^{-14} s.

Réponse: 10^{-3} m/s.

1.4 Résistivité et température

L'augmentation de la résistivité en fonction de la température s'exprime par la relation empirique:

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0)). \qquad (1.6)$$

On en tire:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho(T - T_0)}, \qquad (1.7)$$

ce qui signifie que α est un coefficient moyen de température entre T_0 et T. Sauf dans quelques cas exceptionnels, α dépend de la température; à chaque domaine de température correspond une valeur de α.

La résistivité du platine se caractérise par une bonne constance dans le temps et elle est bien étudiée dans une large gamme de températures. On en tire profit pour fabriquer des thermomètres à résistance de platine qui sont très précis et dont l'utilisation est très répandue.

La résistance de certains alliages comme le constantan et le manganin (Tableau 1.2) varie peu avec la température, on en prend avantage pour fabriquer des résistances étalons et des shunts d'ampèremètres.

Exercice: Une lampe à incandescence de 75 W, dont le filamment est en tungstène, possède une résistance de 60 Ω à 20°C. Calculer la température du filament en fonctionnement à 220 V, sachant que pour le tungstène $\alpha = 4{,}5.10^{-3}\ K^{-1}$.

Réponse: 2188 °C.

TABLEAU 1.1
Propriétés de conduction de certains métaux

métal	résistivité à 20°C (Ω-m)	coef. de temp. de la résistivité (/°C)	densité (g/cm³)	point de fusion (°C)
acier	$1{,}8\ 10^{-7}$	$3\ 10^{-3}$	7,7	1510
aluminium	$2{,}8\ 10^{-7}$	$3{,}9\ 10^{-3}$	2,7	659
argent	$1{,}6\ 10^{-8}$	$3{,}8\ 10^{-3}$	10,5	960
cadmium	$6{,}8\ 10^{-8}$	$3{,}8\ 10^{-3}$	8,7	320
carbone(*)	$3{,}5\ 10^{-5}$	$-5\ 10^{-4}$	1,9	3500
cuivre	$1{,}7\ 10^{-8}$	$3{,}9\ 10^{-3}$	8,9	1080
fer	$1\ 10^{-7}$	$5\ 10^{-3}$	7,8	1530
graphite	$3{,}5\ 10^{-5}$	$1{,}3\ 10^{-3}$	1,7	3500
manganèse	$4{,}4\ 10^{-7}$	$1\ 10^{-5}$	8,4	910
molybdène	$5{,}2\ 10^{-8}$	$4{,}5\ 10^{-3}$	10,2	2625
nickel	$6{,}8\ 10^{-8}$	$6\ 10^{-3}$	8,9	1450
niobium	$1{,}3\ 10^{-7}$		8,6	2415
or	$2{,}4\ 10^{-8}$	$3{,}4\ 10^{-3}$	19,6	1063
palladium	$1{,}1\ 10^{-7}$	$3{,}3\ 10^{-3}$	12	1554
platine	$9{,}8\ 10^{-8}$	$4{,}8\ 10^{-3}$	21,45	1769
plomb	$2{,}07 10^{-7}$	$4{,}2\ 10^{-3}$	11,34	327
rhodium	$4{,}5\ 10^{-8}$		12,4	1960
tantale	$1{,}2\ 10^{-7}$	$3{,}3\ 10^{-3}$	16,6	3000
titane	$4{,}3\ 10^{-7}$		4,5	1680
tungstène	$5{,}6\ 10^{-8}$	$4{,}5\ 10^{-3}$	19	3400
zinc	$5{,}9\ 10^{-8}$	$4{,}7\ 10^{-3}$	7,13	420

* amorphe

1.5 Résistances non ohmiques

Certains conducteurs n'ont pas un comportement ohmique quand ils sont soumis à une tension. Ce sont les *thermistors* et les *varistors*. Les thermistors ont une résistance très sensible à la température et dont la valeur suit la loi:

$$R = R_o e^{A/T} \qquad (1.8)$$

où R_o et A sont deux constantes et T la température. Sous tension, à cause de l'effet Joule, la caractéristique courant-tension d'un thermistor peut avoir une pente négative (Fig. 1.2a). Les thermistors sont des semi-conducteurs composés d'oxydes de Mn, Ni, Fe, Ti,... agglomérés au four. Ils sont utilisés comme thermomètre ou comme bolomètre.

Les varistors possèdent une résistance qui diminue quand la tension augmente (Fig. 1.2b). Ils sont fabriqués avec des granules de carbure de silicium. Les varistors sont placés en parallèle avec des transformateurs et des sous-stations d'usine por absorber le surplus de courant en cas de surtension.

1.6 Supraconductivité

Certains conducteurs, maintenus à une température très basse, appelée *température critique* T_C, ne possèdent plus de résistance; on les appelle des supraconducteurs. Si on établit un courant électrique dans une boucle de fil à l'état supraconducteur maintenu à une température inférieure à sa température critique, ce courant peut durer des semaines, voire des mois, sans s'annuler, car il n'y a aucune perte d'énergie par effet Joule. Il faut remarquer que cette propriété disparaît sous l'effet d'un champ magnétique intense.

TABLEAU 1.2
Propriétés thermoélectriques et de conduction de certains alliages réistifs

nom commercial	composition nominale (% du poids)	résistivité à 20°C(Ω-m)	coef. de temp. de la résistivité (/°C) (autour de 20°C)	variation moyenne de la f.e.m. thermoelectrique par rapport au cuivre (μV/°C) (autour de 20°C)
Alliage N°30	98Cu2Ni	6 10^{-8}	+1,5 10^{-3}	- 13,9
Lohm	94Cu6Ni	1,0 10^{-7}	+8 10^{-4}	- 14,3
Alliage N°90	88Cu12Ni	1,5 10^{-7}	+4 10^{-4}	- 24,5
Alliage N°180	78Cu22Ni	3,0 10^{-7}	+1,8 10^{-3}	- 35,4
Midohm	77Cu23Ni	3,0 10^{-7}	+3 10^{-4}	- 37,0
Advance	57Cu43Ni	4,9 10^{-7}	+/- 4 10^{-5}	- 43,0
Cupron	55Cu43Ni	4,9 10^{-7}	+/- 4 10^{-5}	- 42,4
Copel	55Cu45Ni	4,9 10^{-7}	+/- 4 10^{-5}	- 42,4
Manganin	87Cu13Mn	4,8 10^{-7}	+/- 2 10^{-5}	+ 0,9
Manganin	84Cu13Mn4Ni	4,8 10^{-7}	+/- 1 10^{-5}	- 1,5
Manganin de shunt	83Cu11Mn4Ni	4,5 10^{-7}	+/- 1 10^{-5}	- 1,8
ISA	82Cu12Mn5Ni	4,5 10^{-7}	+/- 2 10^{-5}	- 2,0
NCM	70Cu10Mn20Ni	4,5 10^{-7}	+/- 2 10^{-5}	- 10,0
Isotan	55Cu1Mn45Ni	4,5 10^{-7}	+/- 4 10^{-5}	- 40,0
Tophet A	80Ni20Cr	1,1 10^{-6}	+1 10^{-4}	+ 4,8
Chromel A	80Ni20Cr	1,1 10^{-6}	+1,2 10^{-4}	+ 4,8
Nikrotal L	75Ni17Cr,Si,Mn	1,34$10^{-6}$	+/- 2 10^{-5}	- 1,0
Evanohm	75Ni20Cr,Al,Cu	1,34$10^{-6}$	+/- 2 10^{-5}	+ 0,8
Karma	73Ni20Cr,Al,Fe	1,34$10^{-6}$	+/- 3 10^{-5}	+ 3,0
Balco	70Ni30Fe	2,0 10^{-7}	+4,5 10^{-3}	- 39,9
Hystemco	72Ni28Fe	2,0 10^{-7}	+5 10^{-3}	- 39,2
Tophet C	61Ni24Fe15Cr	1,13$10^{-6}$	+1,3 10^{-4}	- 0,8
Nichrome	60Ni24Fe16Cr	1,13$10^{-6}$	+2 10^{-4}	- 0,8
Nichrome V	80Ni20Cr	1,1 10^{-6}	+1 10^{-4}	+ 4,8
Chromel C	60Ni24Fe16Cr	1,1 10^{-6}	+2 10^{-4}	+ 0,8
Comet	65Fe30Ni5Cr	9,5 10^{-7}	+6 10^{-4}	- 3,9
Chromel D	47Fe25Ni18Cr	1,0 10^{-6}	+3 10^{-4}	- 2,6
Chromax	45Fe35Ni20Cr	1,0 10^{-6}	+4 10^{-4}	- 2,6
Almelec AG51	99Al.5Mg.5Si	3,25$10^{-8}$	+3,6 10^{-3}	
Ductalex	99Al,Be,Cu,Mg	2,8 10^{-8}	+3,9 10^{-3}	
Exconal	63Al37Cu	2,65$10^{-8}$	+4,1 10^{-3}	

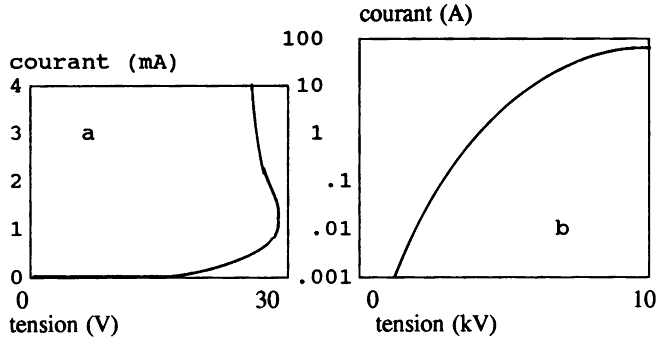


Fig. 1.2: Caractéristique courant-tension d'un thermistor (*a*) et d'un varistor (*b*)

Le champ magnétique critique H_c au-delà duquel la supraconductivité disparaît est lié à la température critique T_c par la formule suivante:

$$H_c\,(T_c) = H_{co}\,[1 - (T_c/T_{co})^2] \qquad (1.9)$$

où H_{co} et T_{co} sont respectivement le champ magnétique critique lorsque T_c tend vers O°K, et la température critique pour $H_c = 0$. Les supraconducteurs possèdent une deuxième propriété importante *l'induction magnétique à l'intérieur d'une substance à l'état supraconducteur est toujours nulle.*

Dans le passé, seule la supraconductivité des métaux et des alliages métalliques était étudiée, au détriment de celle des oxydes. Les supraconducteurs ont repris de l'importance depuis 1986, date à laquelle on a découvert la supraconductivité à T_c élevée pour un certain nombre de céramiques contenant de l'oxyde de cuivre, de l'yttrium, du thallium, du baryum, du calcium et de l'étain, tels que le composé $YBa_2Cu_3O_7$ (T_c = 93K) et surtout l'alliage $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_2O_2$, dont la température critique peut atteindre 125K suivant la disposition des CuO_2 adjacents. Des recherches sont en cours à travers le monde pour trouver d'autres composés à température critique encore plus élevée. Le tableau 1.3 donne la température T_{co} et le champ magnétique H_{co} pour un certain nombre de substances.

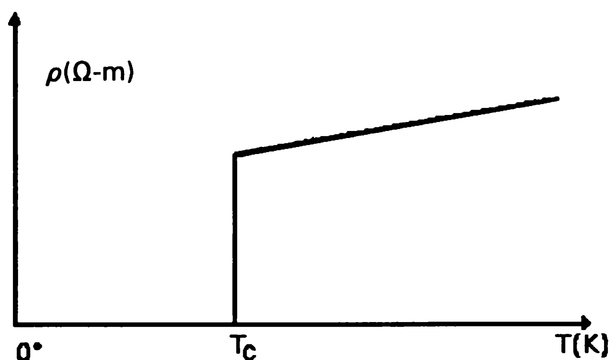


Figure 1.3: Résistivité d'un matériau supraconducteur en fonction de la température.

TABLEAU 1.3
Température critique et champ magnétique critique pour certains métaux et alliages supraconducteurs

Substance	T_{co} (°K)	B_{co} (T)	Substance	T_{co} (°K)	B_{co} (T)
titane	0.4	0,006	vanadium	5,3	0,132
cadmium	0.5	0,003	plomb	7,2	0,082
zinc	0.85	0,005	niobium	9,3	0,196
aluminium	1.2	0,010	NbTi	10,6	10,2
étain	3.7	0,032	Nb_3Sn	18	22
mercure	4.1	0,041	YBaCuO	93	15(?)

1.7 Applications de la supraconductivité

Jusqu'en 1986, il fallait utiliser de l'hélium liquide (4°K) pour descendre en dessous des températures critiques des matériaux supraconducteurs connus. La découverte récente de l'*Ybacuo* permet d'utiliser les propriétés de la supraconductivité en produisant de l'azote liquide (77°K), ce qui est beaucoup moins coûteux. Ces céramiques supraconductrices ouvrent des perspectives nouvelles d'industrialisation, mais les inconnues physiques, chimiques et technologiques sont encore trop grandes pour que l'on puisse faire des prévisions très réalistes.

L'utilisation des matériaux supraconducteurs pour confectionner les bobinages des électrogénérateurs, des moteurs ou des transformateurs permet une grande économie d'énergie puisque les pertes par effet Joule sont absentes.

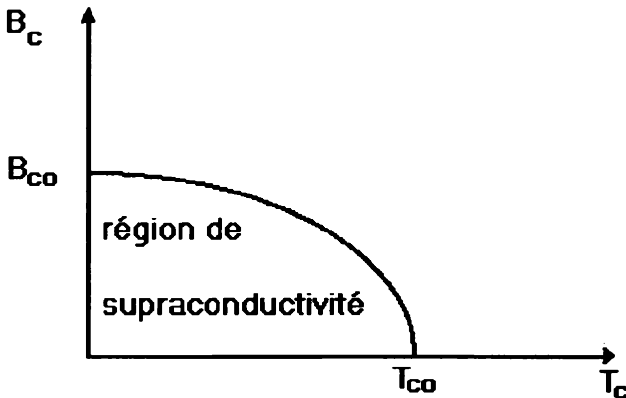


Figure 1.4: Relation entre le champ magnétique critique et la température critique.

Voici quelques exemples d'applications pratiques:

Electro-aimants: bobines fabriquées en tubes supraconducteurs dans lesquels circule un fluide réfrigérant (hélium liquide, ou azote liquide depuis 1986), ce qui permet la production de champ magnétiques intenses allant jusqu'à 150000 Oersted (1,2 10^7 A/m) dans de petits volumes. Ces champs sont couramment utilisés en imagerie médicale (résonance magnétique nucléaire, RMN), détection des particules, etc.

Transport d'énergie: *cryocâbles* comprenant dans la même gaine des éléments supraconducteurs sous forme de brins très fins en NbTi noyés dans une matrice de CuNi, des conduits pour fluide réfrigérant et des isolants thermiques.

Electronique: jonction Josephson, utilisée dans les mémoires électroniques; *quiteron* inventé par Sadeg M. Faris (IBM) en 1982 (Fig.1.5) qui consiste en trois couches supra séparées par deux nanomètres d'isolants;

l'épaisseur totale de ce "transistor" à supraconducteurs est de 100 nm. Les couches S_1 et S_2 sont en niobium et la couche S_3 est un alliage (Pb,In,Au).

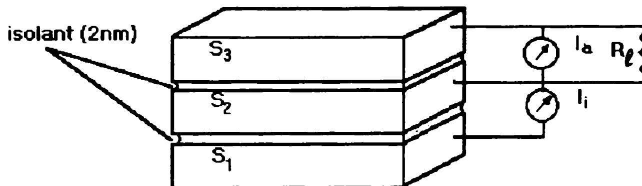


Fig.1.5: Schéma d'un quiteron. Le courant d'injection I_i modifie le courant I_a, avec un gain comme dans un transistor.

1.8 Les conducteurs métalliques

Les conducteurs métalliques peuvent être classés suivant leur utilisation en électricité. On peut les classer par ailleurs en deux catégories: les éléments simples tels que le cuivre, l'aluminium, le tungstène; et les alliages, qui sont constitués d'un élément principal auquel on a ajouté un ou plusieurs autres éléments, comme le cuivre faiblement allié, le bronze ou l'almelec.

1.8.1 Le cuivre et ses alliages

1.8.1.1 Le cuivre électrolytique

Le cuivre électrolytique est obtenu par l'électrolyse d'une solution de sulfate de cuivre avec une anode soluble en cuivre brut et une cathode en cuivre pur. La pureté est supérieure à 99,9%. Le cuivre est ensuite recuit à 200°C.

On utilise dans des cas particuliers des cuivres spéciaux exempts d'oxygène, dénommés OFHC (Oxygen Free High Conductivity), de qualité normale

(99,92 % Cu + Ag) ou de qualité spéciale (99,96% Cu + Ag).

1.8.1.2 Le cuivre faiblement allié

On utilise différents alliages du cuivre pour bénéficier de leur propriétés particulières: leur résistance mécanique, leur résistance chimique ou leurs propriétés magnétiques.

Cuivre au béryllium (0,5 à 2 %): recuit à 750°C et trempé à l'eau, il est ductile et peut être laminé, étiré, formé ou matricé. Durci par chauffage pendant une ou deux heures à 300-320°C, il est amagnétique et il est utilisé comme ressort dans les appareils de mesure.

Cuivre au cadmium (0,06 à 1 %): recuit à 320°C, il résiste aux efforts mécaniques répétés. Il est utilisé pour la réalisation de caténaires de traction électrique de grande portée. Il est aussi utilisé dans les circuits électriques pour l'aviation et comme porte-électrodes pour machines à souder.

Cuivre au cadmium et à l'étain (total < 2%): il possède une bonne résistance à la traction, il est employé pour les fils téléphoniques, les lignes aériennes pour trolleys, les balais pour moteurs électriques, les pièces d'interrupteurs, les bagues de collecteurs.

Cuivre au chrome (0,5 à 0,9%): il a une excellente résistance mécanique à haute température, il est utilisé pour fabriquer des électrodes de machines à souder par points ou à molette, des collecteurs de machines électriques très poussées (fort échauffement), ainsi que des pièces de contact pour gros interrupteurs.

Cuivre au tellure (0,3 à 0,7%): il a une bonne aptitude à l'usinage et une haute conductivité électrique (sa conductivité atteint 98% de celle du cuivre à 20°C). Il résiste à la corrosion et peut être utilisé à température élevée.

Cuivre au zirconium (0,1 à 0,2%): il se fissure assez peu à haute température (jusqu'à 290°C) et il résiste aux vibrations. On l'utilise pour fabriquer les collecteurs de machines à grande vitesse, à température élevée et sous de très fortes vibrations. On l'utilise aussi pour réaliser des disques de Bitter pour bobines à très grand champ magnétique refroidies à l'eau.

TABLEAU 1.5
Propriétés du cuivre faiblement allié

matériau d'apport	pourcentage ajouté	ρ à 25°C (μΩ-cm)	propriétés mécaniques	particularité	utilisation
argent	0,03 à 0,1		résiste au fluage		turboalternateurs
béryllium	0,5 à 2	4 - 11	ductile, durcit par chauffage à 300-320°C	amagnétique	ressorts d'appareils de mesure
cadmium	0,06 à 1	2,5	résiste à la rupture résiste aux effort mécaniques répétés	exempt d'oxygène	caténaires de trolleys
cadmium et étain	< 2		résiste à la traction		caténaires
chrome	0,5 à 0,9	3,5	résiste à la rupture à température élevée		électrode de machine à souder
tellure	0,3 à 0,7	1,75	aptitude à l'usinage	rés. à la corrosion	
zirconium	0,1 à 0,2	1,8 - 2,4	résiste aux fortes vibrations		collecteurs de machines à grande vitesse

1.8.2 Matériaux pour fils conducteurs

1.8.2.1 Fils de bobinage

Les fils de bobinage sont très utilisés dans l'industrie électrique pour produire ou utiliser des champs magnétiques; ils sont souvent placés autour d'un noyau ferromagnétique. Les caractéristiques qui leur sont demandées sont une faible résistance électrique pour éviter l'échauffement et les chutes de tension nuisibles. et une bonne résistance mécanique à la rupture par traction ou par pliages répétés.

Les métaux les plus utilisés sont le cuivre et l'aluminium. L'aluminium pur à 99,5% est très utilisé comme conducteur dans les bobinages rotoriques en cage des moteurs asynchrones. Pour les fils de faibles section on utilise surtout le cuivre électrolytique recuit à 200°C. Le cuivre faiblement allié à l'argent est utilisé dans les enroulements rotoriques des turboalternateurs

de grande puissance. Les fils d'enroulement en cuivre sont isolés les uns des autres par un isolant, qui s'appelle l'émail.

De nouvelles techniques de bobinages sont de plus en plus employées. La technique de bobinage en bande utilise une feuille de cuivre ou d'aluminium de faible épaisseur, dont la largeur est égale à la hauteur de la colonne du transformateur, enroulée de façon à constituer une bobine. L'isolation entre les spires ainsi obtenues est réalisée par du papier ou par des isolants sythétiques en couche mince. Cette technique convient aux transformateur où la densité de courant est importante, l'encombrement étant réduit par rapport aux autre type de bobinage du fait de la suppression des isolants dans le sens longitudinal.

1.8.2.2 Fils de câblage

Il existe deux sortes de câbles: les câbles aériens, nus, en contact avec l'atmosphère et suspendus à des pylônes; et les câbles isolés qui sont souterrains, sous-marins ou suspendus sur une courte distance (voir chapitre 3 paragraphe 3.12).

Pour les câbles aériens, la qualité la plus souvent requise est la résistance à la rupture par traction dans les conditions atmosphériques, qui doit être au moins égale à 350 N/mm. La résistance électrique a une moindre importance puisque, s'il y a échauffement, les câbles sont refroidis par l'air atmosphérique. Leur conductivité est de l'ordre de 98% de celle du cuivre pur.

Ces câbles sont constitués d'alliages moins conducteurs que le cuivre mais plus solides et moins chers. Ils comportent souvent une âme d'acier recouvert d'une gaine plus conductrice en fils de cuivre ou en fils d'aluminium. On utilise aussi des alliages qui présentent une plus grande résistance à la rupture, à base de cuivre (bronze: Cu + Sn) ou à base d'aluminium (almelec: aluminium faiblement allié au magnésium (0,55 à 0,85%) et au silicium (0,45 à 0,75%), ρ = 3,25 $\mu\Omega$-cm).

Pour les câbles isolés, l'âme du câble est formée d'un conducteur qui doit avoir une bonne conductivité. On emploie:

- le cuivre rouge recuit, nu ou revêtu d'une couche métallique (étain ou alliage étain-plomb). La couche de revêtement évite la corrosion par le soufre au cas où l'enveloppe isolante comporte un élastomère vulcanisé.
- l'aluminium ou un alliage d'aluminium, nu ou revêtu d'une couche métallique (nickel ou étain).

L'âme doit également posséder les caractéristiques mécaniques nécessaires pour éviter toute cassure du conducteur à l'intérieur du câble telles que:

- une bonne résistance mécanique, nécessaire au moment de la pose, de la fixation et du serrage des connecteurs,
- une bonne souplesse pour faciliter le passage du câble dans les conduits. Pour obtenir cette souplesse l'âme est composée d'un grand nombre de fils fins.

L'emploi de l'aluminium comme conducteur électrique a pris un grand développement parce que les réserves mondiales d'aluminium sont très importantes et les coûts de production sont plus stables et moins élevés que ceux du cuivre. L'aluminium est autorisé à partir d'une section de 10 mm^2.

Pour une même résistance électrique par unité de longueur, le rapport de la section d'aluminium par la section de cuivre est $\rho_{Al}/\rho_{Cu} = 1{,}63$ et le rapport des masses est alors $m_{Al}/m_{Cu} = 0{,}5$. On voit qu'à longueur égale, 1 kg d'aluminium remplace 2 kg de cuivre.

Exercice: On veut utiliser de l'aluminium pour remplacer le cuivre dans une ligne de transport d'énergie. Soit $a = \rho_{Al}/\rho_{Cu}$ le rapport des résistivités respectives, $b = d_{Al}/d_{Cu}$ le rapport des masses volumiques respectives, et $c = P_{Al}/P_{Cu}$ le rapport des prix respectifs du kilogramme. Quelle doit être la relation entre a, b et c pour que l'utilisation de l'aluminium soit plus rentable ?

Réponse: $a.b.c < 1$.

1.9 Matériaux pour contacts

On entend par contact toute liaison électrique destinée à assurer la continuité électrique entre deux ou plusieurs conducteurs. Les contacts électriques sont très importants en électrotechnique. Il peuvent être le siège

de dégagement de chaleur, de force électromotrice ou de chute de tension. En présence d'humidité, deux métaux différents forment une pile électrique et l'un des deux subit une corrosion plus ou moins rapide (Tableau 1.5). Les contacts doivent être réalisés de façon à en permettre la vérification tout en respectant les conditions de sécurité. Il existe trois sortes de contacts entre deux conducteurs: les contacts permanents non démontables, les contacts permanents démontables et les contacts glissants ou roulants.

1.9.1 Les contacts permanents

Ils sont réalisés par sertissage, rivetage, soudage ou brasage; le brasage est la soudure de deux métaux à l'aide d'un alliage à base de cuivre (brasure); il est utilisé pour raccorder deux conducteurs en cuivre ou en alliage de cuivre. Pour les conducteurs en aluminium on les raccorde par une soudure autogène, soit au chalumeau oxyacétylique, soit à l'arc sous atmosphère d'argon après abrasion de la pellicule d'alumine par un brossage sous graisse. On peut aussi dégager la couche d'oxyde au moyen d'un fer à souder spécial excité par ultrasons (20 kHz). Pour les contacts permanents entre cuivre et aluminium on utilise des manchons composés d'une partie de cuivre et d'une partie d'aluminium réunies par pression à froid. Si le contact entre le cuivre et l'alumnium est réalisé par serrage mécanique, la surface de contact doit être d'abord préparée par brossage et graissage avec une graisse neutre (Contactal, par exemple) afin d'éviter tout risque de déterioration ultérieur. Les conducteurs en aluminum étamé excluent cette préparation de surface. Pour les contacts métal/semi-conducteur dans les circuits intégrés on utilise l'aluminium ou l'or; l'aluminium est évaporé sous vide et l'or est soudé par thermocompression. Pour les contacts des photopiles solaires, on évapore trois couches successives de titane, de palladium et d'argent; le nickel déposé par voie électrolytique tend de plus en plus à remplacer ces trois couches. Pour le montage des composants sur les plaques de circuits imprimés, on utilise la soudure à l'étain. Dans tous les cas il ne doit pas y avoir de chute de tension au niveau du contact.

1.9.2 Les contacts démontables

Pour les contacts démontables, la surface réelle du contact dépend essentiellement de la pression de contact et reste bien inférieure à l'aire apparente de contact des surfaces. La présence de couches superficielles non métalliques, telles qu'oxydes non conducteurs, pellicules organiques, pollutions diverses, diminue cette surface. Le courant passe d'un conducteur à l'autre par des points qui forment des contacts élémentaires et dont le nombre et la surface dépendent de la pression, de la dureté des deux conducteurs, de la qualité de leur surface et de son degré de planéité. La résistance de contact entre deux métaux est donc fonction de la propreté des surfaces en contact; elle est inversement proportionnelle à la pression de contact et, évidemment, elle est fonction des résistivités des deux métaux dans les conditions où se trouvent ces métaux (la température en particulier).

On utilise pour ces contacts différents métaux, suivant les tensions mises en jeu et suivant les contraintes mécaniques ou chimiques. Pour une bonne conductivité thermique et électrique, on utilise l'argent ou le cuivre. Pour une bonne dureté et un haut point de fusion, on utilise le tungstène ou le molybdène. Pour une bonne résistance à la corrosion, on utilise l'or, le platine, l'argent, le nickel ou le rhodium. On utilise aussi des alliages de ces différents métaux pour bénéficier de leurs différentes caractéristiques. Les alliages à haut point de fusion sont obtenus en général par la métallurgie des poudres, tandis que les métaux nobles sont déposés par voie électrolytiques.

Dans les contacteurs; on utilise l'alliage AgCdO, qui donne une durée de vie supérieure à un million d'allumage sous 380 V. Ce matériau très résistant à l'usure peut être remplacé par l'alliage $AgSnO_2$, lui aussi obtenu par la métallurgie des poudres.

TABLEAU 1.6

Potentiel électrochimique relatif de quelques couples d'éléments et d'alliages (fem exprimée en 10^{-2}V)

Anode (+) / Cathode (-)	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w
a=Argent	0	15	17	19	19	21	23	25	26	33	47	18	51	56	71	72	77	77	79	109	110	111	159
b=Nickel		0	02	04	04	06	08	10	11	16	32	33	36	41	53	57	62	62	64	94	95	96	144
c=Monel (30%Cu)			0	02	02	04	06	08	09	16	30	31	34	39	54	55	60	60	62	92	93	94	140
d=Cupro-nickel (70-30)				0	0	02	04	06	07	14	28	29	32	37	52	53	58	58	60	90	91	92	140
e=Cuivre					0	02	04	06	07	14	28	29	32	37	52	53	58	58	60	90	91	92	140
f=Soudure à l'argent						0	02	04	05	12	26	27	30	35	50	51	56	56	58	88	89	90	138
g=Bronzes							0	02	03	10	24	25	28	33	48	49	54	54	56	86	87	88	136
h=Bronze rouge								0	01	06	22	23	26	31	46	47	52	52	54	84	85	88	134
i=Laitons									0	07	21	22	25	30	45	46	51	51	53	83	84	85	133
j=Aciers inox										0	14	15	18	23	38	39	44	44	46	76	77	78	128
k=Etain											0	01	04	09	24	25	30	30	32	62	63	64	112
l=Soudure étain-plomb												0	03	08	23	24	29	29	31	61	62	63	111
m=Soudure étain-argent													0	05	20	21	26	26	28	58	59	60	108
n=Plomb														0	15	16	21	21	23	53	54	56	103
o=Fonte grise															0	01	06	06	08	68	69	40	88
p=Aciers																0	05	05	07	37	38	39	87
q=Alliages d'aluminium																	0	0	02	32	33	34	82
r=Aluminium																		0	02	32	33	34	82
s=Cadmium																			0	30	31	32	80
t=Acier galvanisé																				0	01	02	50
u=Alliages de zinc																					0	01	49
v=Zinc																						0	45
w=Alliages de magnésium																							0

1.9.3 Les contacts mobiles

Dans les contacts glissants, l'un des corps est immobile tandis que l'autre est animé d'un mouvement de translation ou de rotation par rapport au premier. Les qualités requises de ce contact sont l'absence de f.é.m. de contact, l'absence de chute de tension importante, la faiblesse des pertes mécaniques par frottement et la faiblesse de l'usure. L'usure doit être rapportée à l'un des corps, le balai, qui peut être remplacé périodiquement. Le matériau le plus utilisé comme balai est le carbone, pur ou mélangé à du cuivre, de l'argent ou des résines. Sa résistivité varie de $3x10^{-6}$ Ω-m pour le

carbo-argent à $1{,}5 \times 10^{-2}$ Ω-m pour les mélanges résine-graphite. Le carbone et ses mélanges présentent aussi l'avantage d'être autolubrifiants. Dans les machines électriques tournantes, les collecteurs sont en cuivre faiblement allié à l'argent (0,03 à 0,1%); le cuivre recuit à 325°C possède, après écrouissage, une plus haute stabilité thermique qui lui permet de conserver ses propriétés aux températures de soudure tendre. Pour les tramways, le conducteur de contact aérien (caténaire) est en cuivre faiblement allié à du cadmium.

Les contacts entre un conducteur solide et un conducteur liquide sont moins résistifs que les contacts entre deux solides. On utilise comme matériau liquide
- le mercure (température de fusion: -38,9°C), mais il adhère mal aux métaux avec lesquels il ne réagit pas.
- les amalgames Hg-In (liquides à la température ambiante pour moins de 70% d'indium), ne sont pas très stables en cas de brassage mécanique énergique.
- l'eutectique In-Ga (température de fusion: 15,7°C) est très cher à cause du gallium.

1.10 Matériaux pour thermocouples

Un thermocouple est un instrument qui sert à mesurer les températures élevées; il consiste en deux métaux M_1 et M_2 différents, soudés comme l'indique la figure 1.6.

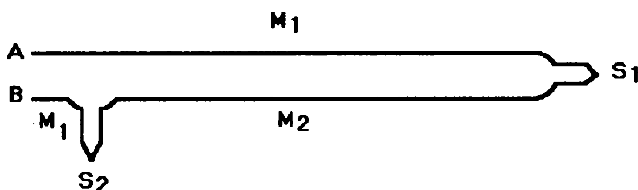


Fig.1.6 schéma de principe d'un thermocouple.

Si les soudures S_1 et S_2 sont maintenues à des températures T_1 et T_2 différentes, il apparait entre les points A et B une différence de potentiel qui est fonction des températures T_1 et T_2 et des matériaux M_1 et M_2. Pour mesurer une température, on maintient la soudure S_2 (soudure froide) à une température fixe T_2 qui est soit l'ambiante soit celle de la glace fondante (0°C), tandis

que la soudure S_1 est mise en contact avec l'endroit dont on veut mesurer la température. La lecture de la d.d.p. V(A) - V(B) donne, grâce à une table de correspondance, la température cherchée. Les tables usuelles donnent la correspondance pour une température froide de à 0°C.

Les matériaux utilisés pour la fabrication de thermocouples sont choisis en fonction de la plage de température à mesurer; les couples de matériaux les plus utilisés sont indiqués dans le tableau 1.7.

TABLEAU 1.7
Caractéristiques des thermocouples les plus usuels

Couple de matériaux (leur composition en pourcentage)	Temp. Max. (°C)	Variation moyenne de de la fem (μV/°C)	fem pour une soudure chaude à 300°C (mV)
Platine, Pt-Rh (90-10)	1760	10	2,32
Chromel, Alumel * (Ni,Cr), (Ni,Al)	1370	40	12,21
Fer, Constantan (60Cu,40Ni)	760	50	16,33
Cuivre, Constantan	400	50	14,86

* Chromel (90%Cr, 10%Ni)
Alumel (94%Ni, 2,5%Mn, 2%Al, 1%Pt, 0,5%Fe)

1.11 Matériaux pour résistances chauffantes

Les caractéristiques exigées des alliages pour résistances chauffantes sont une faible valeur du coefficient de température, l'absence de réaction avec le milieu (oxydation, corrosion, alliage, ...) et une température de fusion élevée par rapport à la température de fonctionnement.

Pour les résistances de chauffage ordinaires on utilise surtout les alliages nickel-chrome (Nichrome ou chromel). Le nichrome (67,5%Ni, 15%Cr, 16%Fe, 1,5%Mn) a une résistivité $\rho = 10^{-6}$ Ω-m et un coefficient de température $\alpha = 1,5\ 10^{-5}$ K^{-1}; il peut fonctionner jusqu'à plus de 1000°C sans perdre ses caractéristiques. Le tungstène, le molybdène et le

graphite sont utilisés comme creusets pour l'évaporation de matériaux sous vide. Pour les applications scientifiques et industrielles, on utilise des cermets (céramique-métal) à base de siliciure de molybdène qui peuvent atteindre des températures de 1700°C; les résistances de réglage de moteur sont en grille de fonte ou en aciers déployés. Les céramiques conductrices sont de plus en plus utilisées comme éléments chauffants pour fours à haute température; en atmosphère oxydante ils résistent mieux que les métaux réfractaires ou le graphite. Le tableau 1.9 fournit les caractéristiques de quelques céramiques conductrices.

TABLEAU 1.8
Quelques matériaux utilisés comme résistance et leur température maximale d'utilisation.

Substance	composition (%)	Temp. Max.(°C)	Substance	Temp. Max.(°C)
Ni-Cr	80-20	1200	Mo	1600
Fe-Ni-Cr	76-12-12	600	Rh	1850
Fe-Ni-Cr	34-43-23	1100	W	2500
Fe-Cr-Al		1350	Ta	2300
Pt-Rh	90-10	1500	Nb	2200
Pt-Rh	80-20	1650	Re	2300
Pt		1400		

TABLEAU 1.9
Principales céramiques réfractaires et leurs conditions d'utilisation.

Composition	Forme	Temp. Max. (°C)	Atmosphère
Carborandum CSi	Baguettes, tubes	1550	Oxydante ou neutre
Superkanthal $MoSi_2$	Baguettes	1700	Oxydante ou neutre
Chromite de lanthane ($LaCrO_3$)	Baguettes, tubes	1750	Oxydante
Zircone stabilisée (ZrO_2-6 % Y_2O_3)	Baguettes, tubes	2200	Oxydante ou neutre
Graphite C	Plaques baguettes	3000	Réductrice

1.12 Matériaux pour fusibles

Les fusibles (ou coupe-circuits) sont des dispositifs, montés en série avec les installations électriques, dont la fonction est d'ouvrir le circuit si le courant qui le traverse dépasse une valeur donnée pendant un temps déterminé.

Le fusible comprend une partie métallique qui fond en cas de montée brusque du courant électrique dans le circuit; cette partie métallique possède les caractéristiques suivantes:
- conductivité électrique élevée;
- température de fusion basse;
- oxydation faible;
- ductilité excellente.

Les fusibles basse tension les plus simples sont constitués de fils métalliques qui fondent à une température relativement basse et servent ainsi comme interrupteur de secours en cas de montée excessive du courant. Pour les fusibles filiformes et nus, le courant de fusion est déterminé par la relation:

$$I = kd^{3/2}, \qquad (1.10)$$

où I est exprimé en ampères; k est un coefficient dépendant de chaque métal ou alliage et d est le diamètre de la section du fil exprimé en millimètres. Le tableau 1.9 donne les matériaux les plus utilisés pour les fusible.

TABLEAU 1.9
matériaux pour fusibles et leurs caractéristiques

matériau	Temp. de fusion (°C)	k	matériau	Temp. de fusion (°C)	k
Ag	960	62	Pb	327	6
Zn	419	14	Al	659	30
Cu	1080	69			

EXERCICES

1.1 Citer deux métaux parmi les conducteurs les moins résistifs; donner leur résistivité.

1.2 Quels sont les matériaux les plus utilisés pour les contacts glissants?

1.3 Donner la principale raison pour laquelle on ne peut pas utiliser le cuivre pour fabriquer une résistance chauffante fonctionnant à 800°C.

1.4 Nommer deux couples de matériaux utilisés pour fabriquer des thermocouples donner la température maximale d'utilisation de l'un d'entre eux.

1.5 Qu'est-ce qu'un supraconducteur? Indiquer quelques utilisations possibles des supraconducteurs. Quels sont les progrès des dernières années dans le domaine de la supraconductivité?

1.6 Qu'est-ce que l'almelec? Pour quelles application est-il utilisé?

1.7 Qu'est-ce que le bronze?

1.8 Qu'est-ce que la température critique d'un matériau supraconducteur ?

1.9 Citer quatre matériaux purs utilisés pour fabriquer des fusibles.

1.10 Quel est l'avantage essentiel du carbone dans les contacts glissants?

1.11 Un contact est une liaison électrique destinée à assurer la continuité électrique entre deux conducteurs. Quels sont les caractéristiques exigées des matériaux utilisés pour réaliser un bon contact d'interrupteur.

1.12 Quelle est l'intensité de coupure d'un fusible filiforme de diamètre d et de coefficient k?

1.13 Quel diamètre de fil de cuivre doit-on utiliser pour transporter un courant de 100 A sous une tension de 220 V avec une chute de tension de 5% tous les 50 m?

1.14 Un câble téléphonique constitué d'un fil de cuivre de 2 mm de diamètre, est long 250 km. Calculer la chute de tension si le courant qui le parcourt est de 1 mA.

1.15 Un câble aérien est constitué d'un noyau d'acier de 1,2 cm de diamètre et d'une enveloppe d'aluminium de 0,4 cm d'épaisseur. Calculer sa résistance pour une longueur de 1 km.

1.16 Citer trois raisons pour lesquelles on n'utilise pas le cuivre pour fabriquer des résistances chauffantes.

1.17 On dispose d'un fil de nichrome très long, de 0,5 mm^2 de section, avec lequel on veut fabriquer une résistance de 600 Watts fonctionnant sur 220 V. Quelle longueur faut-il utiliser? Même question pour 110 V?

1.18 Calculer le diamètre d'un fusible filiforme en argent devant couper un courant de 10 A. Même question pour un fil en aluminium.

1.19 Calculer la résistance d'un fil de bobinage en cuivre de 200 m de long et de 0,06 mm^2 de section. Calculer l'énergie consommée par ce bobinage sous forme de chaleur si l'intensité qui le parcourt est de 5 A.

1.20 On veut mesurer la température exacte d'un four fonctionnant à une température voisine de 800°C. D'après vous, vaut-il mieux utiliser un thermocouple en platine-platine rhodié (à 10%) ou utiliser un thermocouple en cuivre-constantan?

1.21 On dispose d'un thermocouple en platine-platine rhodié. Quelle est la précision sur la température si la

résolution du microvoltmètre ne dépasse pas 25 μV?

1.22 On se propose d'utiliser du cuivre recuit comme bobinage; on dispose d'un fil de 50 m de long et de 0,4 mm de diamètre.
1°) Quelle est la résistance du bobinage à 20°C ?
2°) Quelle est cette résistance à 100°C?
3°) Quel est le courant maximal admissible pour qu'il n'y ait pas fusion?
4°) Si le courant qui parcourt le fil est de 5 A, quelle est la puissance Joule dissipée dans le bobinage?

1.23 On veut mesurer la température d'un four, qui est voisine de 800 °C.
a) Faut-il choisir un thermocouple en platine-platine rhodié (à 10%) ou un thermocouple en cuivre-constantan? Expliquer pourquoi.
b) On choisit un thermocouple en Pt-Pt(Rh) et on mesure une force électromotrice de 7,95 mV. Sachant que la température de la soudure froide du thermocouple est 0°C et en supposant que la variation de la force électromotrice en fonction de la température est régulière et qu'elle est de 10 μV/°C. Quelle est la température du four?

1.24 On utilise un fil de cuivre de 100 m de long pour transporter de l'énergie électrique sous une tension de 220 V afin d'alimenter une lampe à incandescence.
1°) Calculer la résistance de la lampe en fonctionnement en considérant que sa puissance nominale est de 100 W. Est-ce que sa résistance à froid est plus petite ou plus grande?
2°) Calculer la résistance des 100 m de fil de cuivre si on constate une chute de tension de 2% entre la source d'alimentation et la lampe.
3°) Calculer la section du fil de cuivre sachant que sa résistivité est de 1,7 10^{-8} Ω-m.
4°) On veut remplacer le fil de cuivre par un fil d'aluminium.
a) Calculer le rapport de section des deux fils pour que la chute de tension soit la même, la résistivité de l'aluminium étant de 2,8 10^{-8} Ω-m.
b) Calculer la section du fil d'aluminium pour que la chute de tension soit inférieure à 1%.

2

Les isolants

2.1 Introduction

Les diélectriques ou matières isolantes sont des matériaux à très haute résistivité; un bon isolant a une résistivité de l'ordre de 10^{10} à 10^{18} Ω-cm. Contrairement aux conducteurs, ils contiennent une très faible concentration d'électrons libres. Les effets de conduction n'interviennent que dans les résistances de fuite (ou résistance d'isolement). Lorsqu'un diélectrique est introduit dans un champ électrique, la variation de la distribution des charges libres ne donne pas d'effets notables.

Un diélectrique est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Le choix d'un isolant se fait en fonction de ses propriétés et de son prix, les pertes électriques étant dans de nombreux cas considérées comme un facteur secondaire.

2.2 Fonction d'isolement

Le but d'une isolation est d'une part de protéger les personnes, d'autre part de protéger les machines et d'empêcher les pertes inutiles d'énergie.

TABLEAU 2.1
Principaux isolants utilisés dans l'industrie électrique.

Isolants naturels	
Isolants minéraux	***Isolants organiques***
Verre Quartz Céramiques Mica et dérivés Amiante et dérivés	Celluloses Asphaltes et bitumes Cires et paraffines Caoutchoucs naturels Soie naturelle Coton
Isolants synthétiques	
Polymères	
Thermoplastiques	***Thermodurcissables***
Polyéthylène Polystyrène Polyesters linéaires Polyvinyles Polyamides Polycarbonates Polymères fluorés Dérivés de la cellulose Polyimides	Phénoplastes Aminoplastes Epoxydes Polyesters Isocyanates Silicones
Composites et divers	***Elastomères et caoutchoucs synthétiques***
Emaux et vernis Stratifiés divers Compounds et adhésifs	Butadiène Isobuthylène Chloroprène Polysulfides Elastomères fluorés Elastomères de silicones

La fonction d'isolement est d'assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents et de diriger ainsi l'écoulement du courant

dans les conducteurs désirés. L'isolation peut avoir aussi pour fonction d'assurer les supports mécaniques, le transfert de chaleur et la protection contre l'environnement.

2.3 Système d'isolation

Un système d'isolation est un isolant ou un ensemble d'isolants associés dans une machine électrique. Ces matériaux ont subi au cours de leur installation des modifications telles que les performances mesurées sur les matériaux initiaux n'ont plus guère de signification. On a donc recours à des essais fonctionnels sur les systèmes pour les caractériser.

2.4 Notions de base

Soit deux conducteurs séparés A et B portés à deux potentiels différents V(A) et V(B). On démontre que:

1°) les deux conducteurs portent des charges superficielles de densité s, cette densité est positive pour le conducteur dont le potentiel est le plus élevé et négative pour l'autre.

2°) cette densité est inversement proportionnelle au rayon de courbure du conducteur, c'est-à-dire qu'elle est plus importante sur les pointes.

3°) il règne entre les deux conducteurs un champ électrique **E** dont la valeur au voisinage de la surface de l'un des deux conducteurs est σ/ϵ_0. Le potentiel en un point quelconque P(x,y,z) entre les conducteurs est donné par l'expression:

$$V(\mathrm{P}) = -\int_{\mathrm{A}}^{x} \mathbf{E}.\mathbf{d}\boldsymbol{x}. \qquad (2.1)$$

Pour un condensateur plan, l'expression devient:

$$V(\mathrm{P}) = V(\mathrm{A}) - E.L. \qquad (2.2)$$

V(A) est ici le potentiel le plus élevé et L est la distance de P à la plaque A, avec $E = [V(A) - V(B)]/AB$.

Une charge électrique q placée dans un champ électrique **E** subit une force **F** = q**E**, donc une accélération γ = **F**/m, où m est la masse de la charge. Si on place un atome dans un champ électrique, le noyau est attiré dans le sens du champ et les électrons dans le sens contraire. Si le champ est intense, il peut y avoir ionisation.

2.5 Permittivité relative ou constante diélectrique

On appelle permittivité relative ϵ_r, ou constante diélectrique κ (kappa), d'un matériau isolant le quotient de la capacité d'un condensateur dont l'interstice est rempli par ce matériau par la capacité de ce condensateur où l'isolant est remplacé par le vide ou par l'air. La permittivité relative du vide est égale à 1, celle de toute autre matière isolante est supérieure à 1.

Les matériaux qui possèdent un grand nombre de molécules dipolaires capables de s'orienter facilement sous l'effet d'un champ électrique ont une permittivité relative élevée. La valeur de cette permittivité est à peu près proportionnelle à la concentration de dipôles et au carré du moment de chaque dipôle.

Lorsque deux diélectriques sont placé côte à côte dans une région où règne un champ électrique, le champ dans chaque diélectrique est inversement proportionnel à sa constante diélectrique:

$$E_1\kappa_1 = E_2\kappa_2. \tag{2.3}$$

2.6 Dipôle électrique et polarisation

Considérons deux charges +q et -q séparées par une distance d. On appelle *moment dipolaire électrique* le vecteur:

$$\boldsymbol{\mu} = q\mathbf{d}, \tag{2.4}$$

où **d** est vecteur de module *d* et orientée de -q vers +q. Si l'on fait tendre **d** vers zéro en maintenant $\boldsymbol{\mu}$ constant, on obtient à la limite un *dipôle électrique* ponctuel.

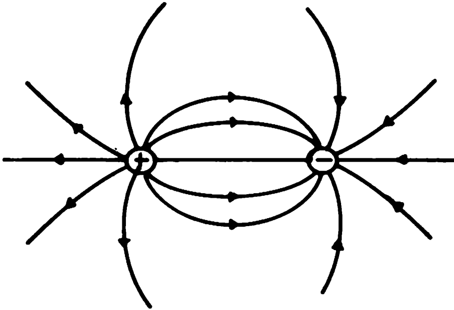


Fig.2.1(a): Lignes de force d'un dipôle électrique.

Un dipôle $\boldsymbol{\mu}$ placé dans un champ électrique **E** est soumis à un couple de forces **M** qui tend à le faire tourner dans le sens du champ:

$$\mathbf{M} = \boldsymbol{\mu} \mathrm{x} \mathbf{E}. \tag{2.5}$$

L'énergie potentielle de ce dipôle est:

$$w = \int_{\pi/2}^{\theta} \mu E \sin\alpha d\alpha \tag{2.6}$$

$$w = -\mu E \cos\theta \tag{2.7}$$

$$w = -\boldsymbol{\mu}.\mathbf{E} \tag{2.8}$$

L'énergie potentielle est minimale quand $\boldsymbol{\mu}$ et **E** sont alignés. Les molécules qui composent un diélectrique peuvent être polaires (le centre de gravité de leurs charges positive n'est pas confondu avec celui de leurs

charges négatives), chaque molécule possèdant un moment dipolaire électrique μ_i. En l'absence du champ électrique extérieur $\mathbf{E}_o$, la somme totale des moments est nulle:

$$\mathbf{P} = \sum \mu_i = 0. \qquad (2.9)$$

En présence du champ électrique, les dipôles tendent à s'aligner pour diminuer leur énergie potentielle et la résultante des moments dipolaires μ_i n'est pas nulle.

$$\mathbf{P} = \sum \mu_i \neq 0 \qquad (2.10)$$

Si les molécules ne sont pas polaires, la présence du champ électrique $\mathbf{E}_o$ déplace le nuage électronique si bien que le centre de gravité des charges négatives devient distinct de celui des charges positives; au niveau de chaque molécule apparaît un dipôle de moment μ_i orienté dans le sens du champ qui lui a donné naissance.

Dans les deux cas, la somme des dipôles contenus dans un élément de volume (lequel contient un grand nombre de molécules) est différent de zéro; on dit qu'il y a *polarisation*. On peut définir un moment dipolaire électrique induit par unité de volume; il est égal au quotient par l'élément de volume ΔV de la somme vectorielle des moments μ_i contenus dans ΔV:

$$\mathbf{P} = \frac{\sum_{\Delta V} \mu_i}{\Delta V} \qquad (2.11)$$

La polarisation induite fait apparaître aux surfaces du diélectrique perpendiculaires au champ des charges superficielles, donnant naissance à un champ induit $\mathbf{E}'$ opposé au champ $\mathbf{E}_o$. Le champ à l'intérieur est donc réduit, et égal $\mathbf{E}_o+\mathbf{E}'$ ou, scalairement, E_o-E'.

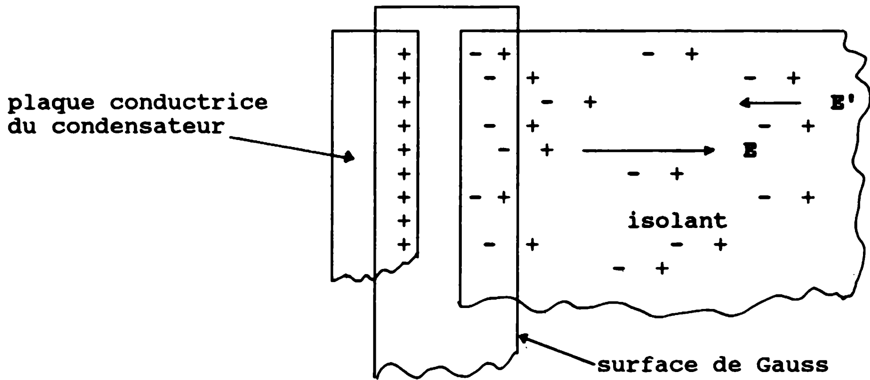


Fig. 2.1(b): Charges libres et charges induites dans un condensateur chargé.

Le théorème de Gauss permet de calculer le champ électrique **E** qui règne dans le diélectrique de la figure 2.1(b). La surface de Gauss est un parallélépipède, et seule la face d'aire A située dans le diélectrique donne un résultat non nul. La charge contenue dans la surface de Gauss peut être prise en considération de deux manières: ou bien on tient compte du diélectrique à travers sa constante κ, ou bien on en tient compte à travers la charge induite q'. On obtient:

$$\oint \mathbf{E}.d\mathbf{s} = \frac{q}{\kappa\epsilon_0} = \frac{q-q'}{\epsilon_0} \qquad (2.12)$$

$$\mathbf{E} = \frac{q}{\kappa\epsilon_0 A}\,;\ \mathbf{E} = \frac{q}{\epsilon_0 A} - \frac{q'}{\epsilon_0 A} \qquad (2.13)$$

En multipliant par ϵ_0 on obtient:

$$\frac{q}{A} = \left[\frac{q}{\kappa\epsilon_0 A}\right] + \frac{q'}{A} \qquad (2.14)$$

Dans l'équation 2.14, la quantité entre crochets représente le champ électrique **E** effectif règnant dans le diélectrique et q' est la charge induite par le champ

électrique dans le diélectrique. En multipliant le numérateur et le dénominateur du dernier terme par l'épaisseur *d* du diélectrique, on obtient au numérateur la quantité *q'd*, qui possède les dimensions d'un moment dipolaire électrique.

$$P = \frac{q'd}{Ad} \tag{2.15}$$

P est le moment dipolaire électrique induit par unité de volume (*Ad* étant le volume total du diélectrique); ce moment est un vecteur de même sens que **E** (dirigé des charges négatives induites vers les charges positives induites); il est appelé *vecteur polarisation.* Nous pouvons alors écrire scalairement la relation (2.14) comme suit:

$$q/A = \epsilon_0 E + P \tag{2.16}$$

et puisque *E* et *P* correspondent à des vecteurs, la quantité *q/A* doit correspondre à un vecteur, qu'on appelle *vecteur déplacement électrique*, ou *vecteur induction électrique* **D**.

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \tag{2.17}$$

La figure 2.2 représente un diélectrique homogène et isotrope qui remplit une partie de l'espace séparant les plaques d'un condensateur. On voit que:

1°/ **D** est connecté aux charges libres seulement; il peut être représenté par des lignes de force qui commencent et finissent sur les charges libres.

2°/ **P** est connecté aux charges de polarisation seulement; ses lignes de force commencent et finisssent sur les charges de polarisation induites.

3°/ ϵ_0**E** est connecté à toutes les charges présentes, qu'elles soient libres ou de polarisation.

L'unité de **P** et de **D** (coul/m^2) est différente de celle de **E** (N/coul).

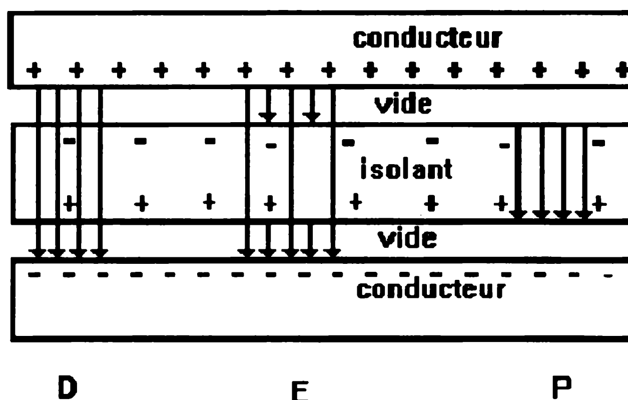


Fig. 2.2: Diélectrique remplissant une partie de l'espace séparant les plaques d'un condensateur plan chargé. Les flèches représentent les lignes de force des vecteurs D (charges libres), ϵ_oE (toutes les charges) et P (charges de polarisation).

Il est à remarquer que seul le vecteur **E** est capable de donner naissance à une force agissantt sur une charge. Les vecteurs **P** et **D** peuvent s'expriment en fonction de **E**. De la combinaison des équations précédentes on peut tirer:

$$\mathbf{D} = \kappa\epsilon_o\mathbf{E} \qquad (2.18)$$

$$\mathbf{P} = \epsilon_o(\kappa\text{-}1)\mathbf{E} \qquad (2.19)$$

En l'absence de diélectrique ($\kappa = 1$), le vecteur polarisation **P** s'annule, alors que $\mathbf{D} = \epsilon_o\mathbf{E}$. Dans le cas général, si le diélectrique n'est pas ferroélectrique ($\mathbf{P} = 0$ alors que $\mathbf{E} = 0$) et s'il est isotrope ($\kappa_x = \kappa_y = \kappa_z$), **P** et **D** sont colinéaires à **E**.

La solution des problèmes complexes est facilitée par certaines règles sur les conditions aux limites déduites des équations de Maxwell et résumées dans le tableau suivant.

TABLEAU 2.2

Nom	Symbole	Associé à	Conditions aux limites
champ électrique	**E**	toutes les charges	composante tangentielle continue
induction électrique	**D**	les charges libres	composante normale continue
polarisation	**P**	charges de polarisation	s'annule dans le vide

Définition de **E**: $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$

Relation générale entre les 3 vecteurs: $\mathbf{D} = \epsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{P}$

Loi de Gauss en présence de diélectrique:

$$\oint \mathbf{D}.d\mathbf{s} = q$$

(q charges libres)

Relations empiriques pour certains diélectriques:

$$\mathbf{D} = \kappa\epsilon_0\mathbf{E}$$

$$\mathbf{P} = (\kappa - 1)\epsilon_0\,\mathbf{E}$$

Remarque: Les deux dernières relations ne sont valables que si κ ne dépend pas de **E**, comme c'est le cas pour les ferroélectriques qui gardent leur polarisation en l'absence de **E**.

2.7 Rupture diélectrique

Si l'on accroit la tension aux bornes d'un diélectrique au-delà d'une certaine valeur, un courant intense traverse le diélectrique suivant un chemin formé par les molécules ionisées; si la puissance de la source d'énergie est suffisante, il y a formation d'un arc électrique; il y a alors rupture, la rigidité diélectrique est perturbée et l'isolant est percé. La rigidité diélectrique d'un isolant gazeux est rapidement rétablie après le percement grâce à la recombinaison des ions et à leur dispersion dans l'espace environnant. Dans le cas d'un diélectrique solide, le percement est définitif et il est caractérisé par une carbonisation locale de l'isolant.

La rupture diélectrique dépend de la nature et de la composition de l'échantillon ainsi que de sa forme et de son environnement. Elle dépend aussi de la manière dont le champ est appliqué (courant alternatif, courant continu, pulsations carrées, ...)

La rupture est un phénomène macroscopique où l'énergie est fournie aux molécules constituant le diélectrique par d'autres particules telles que les ions auxquels le champ électrique a donné suffisamment d'énergie.

Le mécanisme intrinsèque de rupture diélectrique est apparent dans les diélectrique gazeux. Les forces **F** = q**E** augmentent à mesure que le champ E augmente et elles vont jusqu'à ioniser quelques atomes; les ions et les électrons sont accélérés chacun dans un sens, et chaque collision entre une charge et un atome donne naissance à une ionisation donc à deux charges accélérées. Il se produit alors un phénomène d'avalanche. Une conduction par les ions et les électrons s'instaure dans le diélectrique. La rigidité des gaz augmente avec la pression du fait de la diminution du libre parcours moyen dans lequel les charges n'ont pas le temps d'acquérir des vitesses importantes.

Pour les solides, la rupture diélectrique par le mécanisme ionique dépend de la capacité du matériau de réagir avec les électrons accélérés. Dans les matériaux denses, la disposition des atomes est compacte et la probabilité d'interaction des électrons libres avec les atomes est importante, ce qui empêche les électrons d'acquérir des énergies importantes et de provoquer une avalanche.

Dans certains matériaux tels que la cellulose, les atomes (ou les molécules) piègent les électrons libres en formant des ions stables, ce qui a pour effet de ralentir le mécanisme de rupture.

Le mécanisme intrinsèque de rupture peut être aidé par les trois facteurs extérieurs suivants:

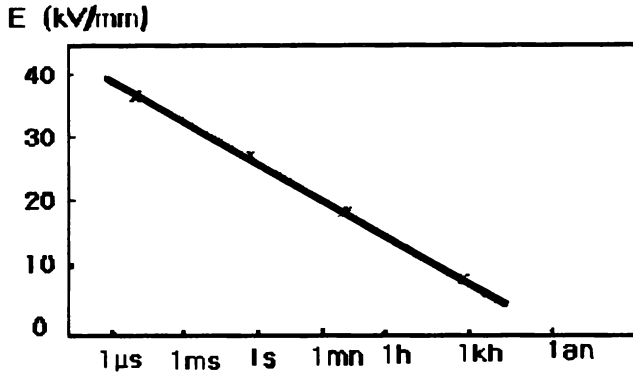


Fig. 2.3 (a): Rigidité de l'isolation d'une machine électrique en fonction de la durée d'application de la tension.

Le facteur thermique. L'agitation thermique peut fournir aux électrons une énergie suffisante pour qu'ils se dépiégent et deviennent des électrons libres. La probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie E_i par un électron est donnée par la formule (voir chapitre 5):

$$f(E_i) = \frac{1}{\exp((E_i\text{-}E_F)/kT)+1} \qquad (5.3)$$

En cas d'augmentation de la température, cette probabilité grandit, les électrons acquièrent une énergie cinétique de plus en plus importante et le nombre des électrons qui se libèrent devient important, ce qui fait baisser la résistivité et facilite l'amorçage du claquage.

Le facteur de pureté. La présence d'impuretés, qu'elles soient isolantes ou conductrices, facilite la rupture, soit par conduction, donc par échauffement localisé, soit par rupture au niveau de l'impureté, donc par détérioration de l'isolant au niveau de l'impureté. L'intensité du champ dans des diélectriques en série est inversement proportionnelle à la permittivité. Ce qui facilite la rupture dans les diélectriques composites ou impurs.

2.8 Tension de rupture ou tension de claquage, rigidité diélectrique

La tension de claquage d'un isolant est la tension à laquelle se produit la rupture diélectrique. La rigidité diélectrique d'un isolant est déterminée par l'intensité du champ électrique provoquant la rupture diélectrique.

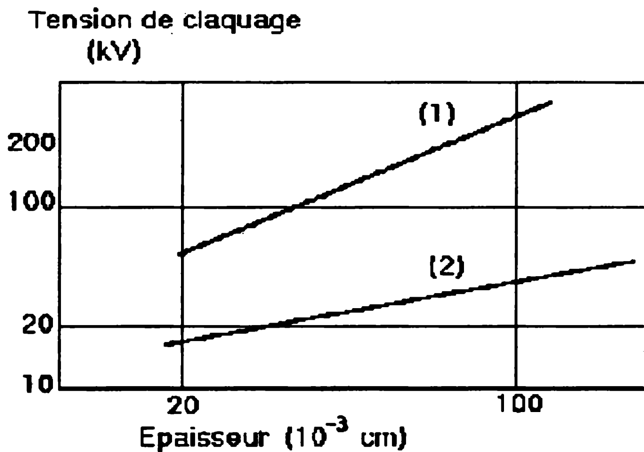


Fig. 2.3(b): Tension de claquage du polyéthylène en fonction de l'épaisseur. (1): courant alternatif (n = 0,5), (2): courant continu (n = 0,86).

La rigidité diélectrique n'est pas une constante de la matière; elle dépend de l'épaisseur de l'isolant, de la forme des électrodes, etc... La tension de claquage U est liée à l'épaisseur d du matériau par la relation empirique:

$$U = E_c \, d \exp(n) \qquad (2.20)$$

où n est fonction de la nature du milieu ambiant, de la tension appliquée et de la durée de l'essai (Fig. 2.3); n est souvent de l'ordre de 0,7. La décroissance de la rigidité en fonction de l'épaisseur s'explique par le fait

que le diélectrique ne peut pas être très homogène sur une très grande épaisseur; la présence d'impuretés ou de défaut change cette caractéristique en créant des points faibles par lesquels peut s'amorcer le claquage. La rigidité d'un matériau n'a pas de signification si l'épaisseur sur laquelle a été déterminée cette rigidité n'est pas mentionnée.

2.9 Résistance d'isolement

La résistivité d'un diélectrique est très élevée; elle se mesure en teraohm-mètre (TΩ-m). Un isolant placé entre les plaques d'un condensateur présente deux résistances au passage du courant: une résistance transversale, qui est la résistance d'un cube carré du matériau de côté l'unité, et une résistance superficielle, qui est la résistance d'un carré du matériau de côté l'unité. La résistance transversale est une caractéristique du matériau isolant tandis que la résistance superficielle caractérise l'état de surface du matériau (humidité, poussière, etc...). La conduction transversale résulte du mouvement des rares électrons libres et du mouvement très difficiles des ions; elle résulte aussi du mouvement des dipôles quand ils s'alignent sous l'effet du champ électrique. La conduction par dipôles disparaît très vite dans le cas d'un champ continu, mais persiste en cas de champ alternatif.

Le circuit équivalent d'un isolant placé entre deux conducteurs est donné par la figure 2.4. La résistance R en parallèle dépend de plusieurs facteurs:
- l'état de surface et de l'environnement (l'humidité augmente la conductivité des isolants).
- la température (les isolants ont un coefficient de température α négatif).
- la valeur de la tension appliquée et la durée de son application, et de sa fréquence. Ces trois facteurs entrainent une baisse de la valeur de R.

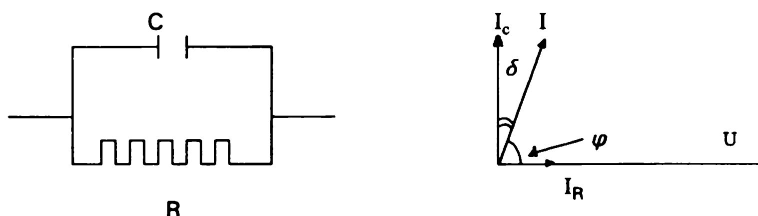


Fig. 2.4: Circuit équivalent d'un condensateur contenant un diélectrique entre ses plaques, et son angle de perte δ dans la représentation complexe de l'intensité d'un courant alternatif.

2.10 Angle de perte δ et facteur de dissipation tgδ

Le vide mis à part, tous les isolants possèdent une résistance finie qui s'appelle *résistance d'isolement*. Lorsqu'un diélectrique est soumis à une tension alternative, un courant électrique s'établit; il peut être de conduction (dû aux électrons libres) ou d'absorption (dû à l'orientation instantanée des dipôles) et il donne lieu à des pertes diélectriques; il est en avance de phase sur la tension; le complément de l'angle de phase φ (Fig 2.4) s'appelle l'*angle de perte* δ. En général δ est petit et il peut être confondu avec sa tangente. Pour le circuit de la figure 2.4:

$$\mathrm{tg}\varphi = R/Z_c \qquad (2.21)$$

où $Z_c = 1/C\omega$ et $\omega = 2\pi f$, f désignant la fréquence de la tension appliquée,

$$\mathrm{tg}\delta = 1/\mathrm{tg}\varphi = 1/RC\omega. \qquad (2.22)$$

La tangente de l'angle de perte δ nommée *facteur de dissipation*, varie pour les bons isolants entre 10^{-2} et 10^{-4}. Si le facteur de dissipation prend une valeur

élevée, il y a échauffement dans le diélectrique ce qui peut conduire au claquage ou à la détérioration du diélectrique.

Pour la simplicité de calcul dans certains problèmes, on peut exprimer la permittivité relative sous une forme complexe :

$$\kappa^* = \kappa' - \kappa'',$$

où le teme κ', appelé *constante diélectrique*, est la partie réelle et le terme κ'', appelé *indice de pertes*, est la partie complexe. Le facteur de dissipation tg(δ) est alors défini comme suit:

$$\mathrm{tg}\delta = \kappa''/\kappa'.$$

Pour un condensateur plan de surface S et d'épaisseur d, rempli d'un diélectrique de constante κ et de résistance R, il y a une perte d'énergie sous forme d'échauffement du diélectrique. On définit les pertes par unité de volume:

$$W_u = (U^2/R)/(S.d), \qquad (2.23)$$

où U est la tension appliquée. Si ω est la pulsation, en multipliant l'expression précédente par $\omega\kappa\epsilon_0 S/d$ et en divisant par $C\omega$, on obtient:

$$W_u = (U/d)^2\epsilon_0\omega(\kappa\mathrm{tg}\delta). \qquad (2.24)$$

La quantité $\kappa\mathrm{tg}\delta$ (ou κ'') est l'indice de pertes. Ces pertes par unité de volume s'expriment en *watt/unité de volume*; pour les calculer en Watts par cm^3 on utilise la formule:

$$W_u = 5/9\ \kappa'' f E^2 10^{-12}$$

où f est la fréquence et E le champ exprimé en V/cm.

L'indice de perte κ'' est fonction de l'humidité, de l'intensité du champ électrique, de la fréquence et de la température. L'humidité fait augmenter les deux termes, κ et tgδ, de l'indice de pertes.

Les pertes diélectriques augmentent comme le carré de l'intensité du champ. La chaleur produite dans le

diélectrique fait diminuer la résistance R et augmenter le facteur de dissipation tgδ. La pente de la courbe tgδ = f(E) dans le domaine de tension considérée est une caractéristique de l'état d'une isolation donnée. L'indice de pertes varie avec la fréquence; la variation est compliquée; elle présente des maxima pour certaines fréquences, dites fréquences de relaxation, qui dépendent de la température sauf pour certains isolants tels que le quartz fondu, le polystyrène ou le polyéthylène.

2.11 Détermination du champ électrique dans un isolant

Soit un condensateur dont les plaques sont séparées par deux isolants parallèles d'épaisseurs respectives d_1 et d_2 et de constantes diélectriques respectives κ_1 et κ_2; les deux isolants remplissent l'espace séparant les plaques du condensateur. Si on maintient l'une des plaques du condensateur au potentiel zéro et l'autre au potentiel V, la tension aux bornes du condensateur est V et le potentiel en un point P situé entre les plaques est donné par l'expression:

$$V(P) = - \int_0^x E.dx, \qquad (2.25)$$

où E est le champ électrique au point P et x la distance de P à la plaque maintenue au potentiel zéro. Dans un diélectrique homogène, le champ E est constant et inversement proportionnel à la constante diélectrique κ. On peut donc établir le système d'équations suivant:

$$E_1\kappa_1 = E_2\kappa_2 \qquad (2.26)$$

$$E_1 d_1 + E_2 d_2 = V \qquad (2.27)$$

Ce système nous donne E_1 et E_2, et par suite la différence de potentiel aux bornes de chaque diélectrique. Ce calcul est particulièrement utile dans le cas où un diélectrique comporte des inclusions d'air.

Exercice: Soit un condensateur plan dont les plaques sont séparées par des feuilles de mica collées au vernis; l'épaisseur totale de ces isolants est de 2,5 mm; lors du collage, une bulle d'air est restée prisonnière; son épaisseur est de 1 mm. Y aura-t-il claquage si la tension maximale appliquée est de 11 kV?

Pour répondre à la question, commençons d'abord par calculer le champ électrique qui règne dans chacun des deux milieux. On utilise le système d'équations précédent, sachant que pour le mica $\kappa = 7$; soit respectivement E_1 et E_2 le champ électrique le mica et dans l'air:

$$E_2 = 7E_1 \tag{2.28}$$

$$2{,}4E_1 + 0{,}1E_2 = \mathrm{U}. \tag{2.29}$$

Donc E_2 = 24,8 kV/mm et E_1 = 3,51 kV/mm. Les rigidités respectives du mica et de l'air sont de 25 et 3.1 kV/mm; par conséquent il y a claquage dans la bulle d'air; les décharges électriques s'y produisent et des oxydes apparaissent; l'isolant est alors détruit petit à petit.

2.12 Effet couronne

Soit un cylindre très long de rayon R porté à un potentiel U par rapport à un cylindre plus grand, de rayon a et de même axe que le premier dont il est séparé par de l'air. A la surface du petit cylindre règne un champ radial E_0. Dans la région séparant les deux cylindres règne un champ radial $E = E_0R/r$, où r est la distance à l'axe du petit cylindre. Le potentiel et le champ sont en fait liés par la relation:

$$V(P) = - \int E.dr = - E_0 R \int dr/r, \qquad (2.30)$$

ce qui donne

$$V = RE_0 \ln(k/r), \qquad (2.31)$$

où k est une constante d'intégration déterminée par la condition $V(a) = 0$,

$$E_0 = U/(R.\ln(a/R)), \qquad (2.32)$$

Imaginons maintenant deux conducteurs cylindriques de même rayon R et distants de a ($a >> R$), et appliquons entre eux une d.d.p. U (pour un courant alternatif, U est la tension de crête). Au voisinage de chacun des deux conducteurs se crée un champ E_0 qui est fonction des trois grandeurs citées; si le champ est intense, il peut ioniser l'air qui entoure les conducteurs, provoquant l'apparition d'une lueur violette entourant le conducteur accompagnée d'un léger crissement; c'est l'*effet couronne*. Si les conducteurs sont suffisamment rapprochés et si la tension augmente, il y a claquage de l'air. Le claquage peut avoir en l'absence d'effet couronne si le rapport a/R est inférieur à 5.85 (d'après Peek). En fait, la valeur de l'intensité du champ E_c - intensité à laquelle une décharge en couronne a lieu - dépend énormément de l'état de surface du conducteur et des conditions de l'environnement. L'effet couronne n'engendre pas seulement des pertes d'énergie, il donne aussi naissance à l'ozone (O_3), qui est un puissant oxydant, et il est source de bruit radioélectrique. L'effet couronne peut apparaître dans d'autres isolants que l'air si E_0 est supérieur à la rigidité de l'isolant en question.

2.13 Résistance à l'arc

La résistance à l'arc est une donnée liée à la facilité avec laquelle une matière isolante perd ses propriétés d'isolation sous l'action d'un arc électrique près de sa surface. L'arc peut provoquer une érosion, une combustion ou la formation d'un chemin conducteur sur

la surface de l'isolant. On utlise des tests pour classer les matières en fonction de leur résistance à l'arc. Cette résistance est mesurée en secondes pour des arcs à faible courant et ne peut être que purement indicative.

2.14 Influence de la température

L'effet de la température varie d'un isolant à d'autre et il est particulièrement néfaste pour les isolants organiques. Une élévation de température peut donner naissance à:

- une diminution de la résistance d'isolement,
- une oxydation avec formation de produits acides et réticulation si bien que le produit devient cassant,
- un ramollissement qui peut atteindre la fusion,
- une dépolymérisation et une évaporation engendrant des bulles gazeuses
- une polymérisation ou une hydrolyse,
- une baisse de la rigidité.

Tous ces effets ont une conséquence commune: la diminution de la durée de vie de l'isolation. Plus la température de fonctionnement est élevée, plus la durée de vie est courte. Les phénomènes qui se produisent à température élevée dans les isolants ont pour origine des réactions chimiques; on peut donc affirmer sans trop se tromper que les lois qui régissent l'évolution des propriétés des isolants sont les mêmes que celles qui régissent les réactions chimiques, c'est-à-dire la relation d'Arrhénius

$$\mathrm{Log}(t) = A/T + B, \qquad (2.33)$$

où t est la durée de vie, T la température et A et B des paramètres dépendant du matériau isolant utilisé.

C'est vers 1930 que Montsinger et Büssing ont trouvé, de façon empirique, une expression approchée de la loi d'Arrhénius qui s'énonce de la manière suivante: *toute augmentation de n °C de la température d'une isolation conduit à doubler sa vitesse de vieillissement.* Ils ont établi que, pour une isolation à base de papier, n est de l'ordre de 8°C. Nous pouvons retenir la valeur de 10°C pour n dans la majorité des cas.

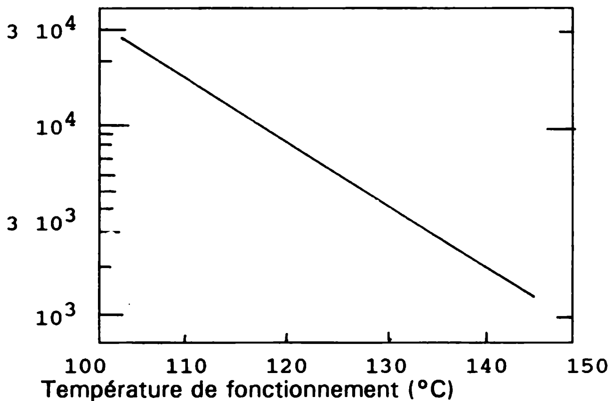


Fig. 2.5: Durée de vie d'une isolation en fonction de la température de fonctionnement.

L'élévation de la température des isolants est provoquée par les pertes dans la résistance d'isolement dont la valeur est finie, et aussi par l'échauffement des conducteurs par effet Joule et par les courants de Foucault.

La chaleur produite dans les conducteurs est difficilement évacuée car la conductivité des isolants est très basse; il faut noter, à titre d'exemple, que pour obtenir une isolation thermique équivalente à celle d'un millimètre d'air immobile, il faut environ 8 mm d'isolant solide ou 16 mètres de cuivre; d'où la nécessité d'éviter l'inclusion de bulles d'air afin de faciliter l'évacuation de la chaleur.

La conductivité thermique des isolants détermine donc la température maximale atteinte par l'isolation. Les valeurs les plus élevées sont obtenues pour les isolants minéraux (céramiques: 2 à 4 W/m°C, mica: 0,4 à 0,8 W/m°C, amiante: 0,1 à 0,4 W/m°C); les valeurs décroissent ensuite successivement des thermodurcissables à charge minérale (0,2 à 0,6 W/m°C) jusqu'à certains thermoplastiques tels que le polystyrène, le polypropylène et le polyvinyle (0,04 à 0,2 W/m°C).

Il faut minimiser l'épaisseur d'un isolant pour favoriser l'évacuation de la chaleur; mais d'autres

facteurs, par exemple la rigidité diélectrique et la résistance mécanique, imposent d'utiliser des épaisseurs supérieures, si bien qu'une optimisation de l'épaisseur est nécessaire.

2.15 Classification thermique des isolants

Les matériaux isolants sont classés suivant la température maximale en dessous de laquelle ils ont une durée de vie d'une dizaine d'années. Nous reproduisons dans le tableau 2.3 la classification de la C.E.I. (Commission Electrotechnique Internationale) et dans le tableau 2.4 celle de l'IEEE (Institute of Electrical Electronic Engineers).

Cette classification ne concerne que les matériaux. Il serait pourtant plus intéressant de classer les systèmes d'isolation, c'est-à-dire l'ensemble d'isolants disposés comme ils le sont dans le machine réelle, on pourrait ainsi se rendre mieux compte, dans les essais d'endurance, des interactions entre isolants et de l'influence des autres contraintes combinées à la contrainte thermique. Dans le tableau 2.5, nous donnons les matériaux isolants les plus couramment utilisés et leur température maximale d'utilisation.

TABLEAU 2.3
Classification thermique des isolants
(Publication 85 de la C.E.I)

Classe	Température limite (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	>180

D'autres facteurs provoquent la diminution de la durée de vie des isolants organiques. Il faut citer l'atmosphère corrosive (gaz nocifs, produits chimiques, ozone,...),

l'humidité, la poussière, les organismes vivants (micro-organismes fongueux, vermine), les agressions mécaniques (vibrations, abrasion,...). La plupart des facteurs chimiques sont accélérés par l'élévation de la température.

TABLEAU 2.4
Classes d'isolants

Classe	Définition (IEEE Standard No 1, 1962)
90°C (O)	Matériaux ou combinaisons de matériaux tels que le coton, la soie naturelle, le papier, le bois, le polyéthylène, le caoutchouc naturel vulcanisé, le PVC avec ou sans plastifiant.
105°C (A)	Matériaux ou combinaisons de matériaux tels que le coton, la soie ou le papier lorsqu'ils sont convenablement imprégnés ou recouverts, ou lorsqu'ils sont immergés dans un liquide diélectrique tel que l'huile. Matériaux dont on démontre par expérience ou par tests approuvés qu'ils ont la même durée de vie thermique à 105°C.
120°C (E)	Produits de la classe A mis à l'abri de l'air ainsi que de nombreuses matières plastiques (résines polyester, téréphtalate de polyéthylène, etc...).
130°C (B)	Matériaux ou combinaisons de matériaux tels que le mica, la fibre de verre, l'amiante, etc., utilisés avec des substances adhésives convenables, telles que asphaltes, gomme-laque, etc...
155°C (F)	Matériaux ou combinaisons de matériaux tels que le mica, la fibre de verre, l'amiante, etc., utilisés avec des substances adhésives ayant une meilleure stabilité thermique que celles de la classe B telles que les résines alkydes, les silicones alkydes, etc...
180°C (H)	Matériaux ou combinaisons de matériaux tels que les silicones, les polyimides, le mica, la fibre de verre, l'amiante, etc... utilisés avec des substances adhésives convenables, telles que les résines aux silicones, l'élastomère de silcone, etc...
220°C (C)	Matériaux composés entièrement de mica, de porcelaine, de verre, de quartz et de matériaux inorganiques semblables. Matériaux ou combinaisons de matériaux dont on démontre par expérience ou par tests approuvés qu'ils ont la même durée de vie thermique à 220°C.

Ces standards sont établis par l'*Institute of Electrical Electronic Engineers (IEEE)* en considérant qu'une durée de vie normale correspond à 20 000 heures de fonctionnement à la température précisée. Ainsi un appareil électrique dont l'isolation appartient à la classe 130°C aurait probablement une durée de vie de 2,28 ans s'il fonctionnait sans interruption à cette même température. Par ailleurs, s'il ne fonctionnait que 8 heures par jour, sa durée de vie serait évidemment multipliée par trois. Noter que ces spécifications supposent que l'isolant ne vient pas en contact avec des atmosphères corrosives, poussiéreuses ou trop humides.

TABLEAU 2.5
Propriétés des matériaux isolants les plus utilisés.

Isolant	rigidité diélectrique (kV/mm)	κ	T_{max} (°C)	conductivité thermique (W/m°C)	densité
	ISOLANTS GAZEUX				*(kg/m³)*
Air (N_2+O_2)	3	1	2000	0.024	1.29
Azote (N_2)	3.5	1	2000	0.024	1.25
Hydrogène (H_2)	2.7	1	2000	0.17	0.09
Oxygène (O_2)	3	1	2000	0.025	1.43
Dioxyde de carbone (CO_2)	3	1	2000	0.014	1.98
Hexafluorure de soufre SF_6	30	1	2000	0.014	6.6
Fréon (CCl_2F_2)	9	1		0.008	
	ISOLANTS SOLIDES MINERAUX				*(g/cm³)*
Amiante solide	1	2	1600	0.4	2.0
Laine d'amiante	1		1600	0.1	0.4
Mica	40-240	7	500-1000	0.38	2.8
Oxyde de Mg	3	4	1400	2.4	
Porcelaine	4	6.5	1300	1.0	2.4
Verre	100	5-7	600	1.0	2.5
Silice	5-15	3.8	1000		2.1
	ISOLANTS ORGANIQUE NATUREL				
Caoutchouc	12-20	4	65	0.14	0.95
papier	14	4-7	120	0.17	1.1
Coton	40	7	105		
	ISOLANTS LIQUIDES				
Huiles minérales	25	2.2	105	0.16	0.88
Askarels	20	4	120	0.11	1.65
Huiles silicones	15	2.6	200	0.15	0.95

EXERCICES

2.1 Citer trois isolants solides de classe thermique C.

2.2 Qu'est-ce que la rigidité diélectrique? En quelle unité se mesure-t-elle?

2.3 Quelle est l'influence de la conductivité thermique d'un isolant sur sa durée de vie?

2.4 Pourquoi cherche-t-on à donner une épaisseur minimale à l'isolant qui recouvre les conducteurs? (Citer deux raisons).

2.5 Quels sont les facteurs qui peuvent diminuer la durée de vie d'une isolation? (en citer quatre au moins).

2.6 Citer les deux inconvénients qui découlent de l'inclusion de bulles d'air dans la confection des isolants.

2.7 Expliquer le mécanisme ionique de la rupture diélectrique.

2.8 Qu'est-ce que le mécanisme intrinsèque de rupture diélectrique?

2.9 Qu'est-ce que l'effet couronne?

2.10 Déterminer la tension de claquage des objets suivants:
a) une vitre d'épaisseur 3 mm (rigidité = 100 kV/mm)
b) une page de votre cahier ayant 80 μm d'épaisseur (rigidité = 7 kV/mm).

2.11 Un moteur dont l'isolation est de classe B est contraint de fonctionner à 140°C; quelle est sa durée de vie à cette température si elle est de 10 ans en régime normal?

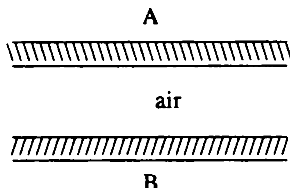
2.12 Une isolation de 1 cm d'épaisseur sépare deux conducteurs soumis à des potentiels qui différent de 2000 V sur une surface de 40 cm² avec une fréquence 50 Hz. Connaissant κ = 10 et tgδ = 0,02, calculer l'échauffement de l'isolant par unité de temps.

2.13 Calculer le diamètre limite d'une bulle d'air pour lequel un claquage a lieu. La bulle est incluse dans une isolation de 5 mm d'épaisseur et de permit-tivité 5, la tension appliquée étant de 10 kV. (Tracer la courbe du champ dans la bulle d'air en fonction de son épaisseur entre 0,5 mm et 5 mm). Ce diamètre est-t-il minimal ou maximal?

2.14 Deux fils de transport d'énergie sont distants de 1 m et ont chacun un diamètre de 7,5 mm; quelle différence de potentiel maximale peuvent-ils supporter sans qu'ils y ait effet couronne ?

2.15 Soient deux câbles aériens de 10 mm de diamètre, transportant de l'énergie et distants de 1 m.
a) Si la tension entre les deux câbles est de 90 kV, calculer s'il y a effet couronne.
b) A partir de quelle distance entre les câbles l'effet couronne apparaît-il, sachant que cet effet apparaît à partir d'un champ E = 3 kV/mm à la surface du câble?.

2.16 Soit un condensateur plan (figure ci-dessous) dont chaque plaque est recouverte d'un film en acétate de cellulose d'épaisseur 1 mm (κ = 5, rigidité = 10 kV/mm); l'isolation de chacune des plaques est séparée de l'autre par un interstice d'air de 8 mm d'épaisseur; la différence de potentiel entre les plaques est U = 25.2 kV.
a) Calculer la valeur du champ E dans l'isolation et dans l'air.
b) Calculer le potentiel au niveau de la séparation air-acétate si V(A) = 0 et V(B) = U.
c) Dessiner sur un même graphique $V(r)$ et $E(r)$, r étant l'abscisse entre A et B sur l'axe perpendiculaire aux deux plaques.



2.17 Soit une isolation de classe B, d'épaisseur 1 mm, de permittivité 8 et de rigidité 30 kV/mm. On a mesuré son angle de perte δ ($tg\delta$ = 0,001) et on lui prévoit une durée de vie de 10 ans en régime normal.
1°) Calculer l'échauffement de l'isolation par unité de volume et par unité de temps si la dif-férence de potentiel est de 10 kV.
2°) En fait, a cause d'une mauvaise fabrication, l'isolation comporte une bulle d'air de 1/10 mm d'épaisseur.
a) Calculer le nouveau champ dans l'isolation.
b) Calculer le champ dans la bulle d'air.
c) Commenter le résultat de question b.

2.18 Soit une isolation de constante diélectrique k, de facteur de dissipation $tg\delta$ et d'épaisseur d, soumise à une différence de potentiel alternative U de fréquence industrielle.
a) Quel est le champ électrique qui règne dans l'isolation?
b) Calculer l'échauffement de l'isolation par unité de volume et par unité de temps.
c) Connaissant la chaleur massique de l'isolant C_p (J/g) et la masse volumique ρ (g/cm), et en supposant qu'il n'y a pas de dissipation de chaleur vers l'extérieur, calculer la température atteinte par l'isolant au bout d'une heure de fonctionnement sachant que la température ambiante est T_a.

2.19 Soit un isolant organique remplissant l'espace situé entre les deux armatures d'un condensateur; son épaisseur est e_1 = 10 mm et sa permittivité relative est ϵ_1 = 8. Les bornes du condensateur sont soumises à une tension alternative (50 Hz) de 80 kV. La surface du condensateur est S_1 = 10 cm^2.
1°) Calculer la capacité du condensateur.
2°) Calculer le facteur de dissipation $tg\delta$ en présence d'une résistance d'isolement de 10^{10} Ω (en parallèle).
3°) Calculer la puissance d'échauffement de l'isolant par unité de volume.
4°) L'isolant comporte une bulle d'air d'épaisseur e = 1 mm, calculer le champ électrique qui règne dans la bulle.
5°) La tension de claquage de cette bulle est de 3,5 kV. Expliquer ce qui se passe quand on applique 80 kV aux bornes du condensateur.
On donne ϵ_0 = 8,85 10^{-12} F/m.

2.20 Soit une isolation de 4 cm d'épaisseur et de 13 de permittivité. Elle est soumise à une tension alternative (50 Hz) de 14 kV.
a) Calculer son facteur de dissipation si on suppose qu'il y a une résistance de fuite en parallèle de 5 10^9 Ω pour une surface de 100 cm^2.
b) Calculer l'énergie absorbée par cette isolation au bout d'une heure de fonctionnement.
c) La classe thermique de cette isolation est B. Sa température de fonctionnement est supérieure de 10°C à celle de sa classe. Quelle est cette température? De combien diminue alors sa durée de vie?

2.21 Pour séparer deux conducteurs plans portés à des potentiels qui diffèrent de 5 kV sous 50 Hz, on utilise une isolation de classe E possédant les caractéristiques suivantes:
permittivité relative: κ = 8,
rigidité: E_c = 10 kV/mm,
facteur de dissipation:
$tg\delta$ = 0,001,
épaisseur: 1 mm.
1°) Calculer le champ dans l'isolation; y a-t-il danger de claquage? Pourquoi?

2°) Calculer la résistivité de l'isolant.
3°) Calculer son échauffement par unité de volume.
4°) L'un des conducteurs s'éloigne de 1 mm de l'isolation. Calculer le champ qui règne dans l'isolant et dans l'air. Commenter.

2.22 Un électro-aimant dont l'isolation appartient à la classe A, a une durée de vie normale de 2 ans. Quelle sera sa nouvelle durée de vie si on le rebobine en utilisant un isolant de classe F?

2.23 Expliquer pourquoi la résistance d'isolement d'un diélectrique est plus faible dans le cas d'un courant alternatif que dans le cas d'un courant continu.

2.24 La constante diélectrique d'un isolant imparfait peut s'écrire sous une forme complexe:

$$\kappa^* = \kappa' + \kappa''$$

Le terme κ' étant la constante diélectrique en phase et le terme κ'' étant le terme en quadrature de phase.
a) Exprimer le facteur de dissipation en fonction de κ' et κ''.
b) Comment appelle-t-on κ'' en électrotechnique?
c) Exprimer en fonction de κ'' la dissipation de chaleur (en W/m^3) dans une isolation soumise à un champ E alternatif de fréquence f.

3

Les différentes familles de produits isolants

A- LES ISOLANTS SOLIDES

3.1 Les émaux

Les émaux sont des solutions de polymères; ils sont appliqués sur les fils conducteurs et recuits en un processus continu pour donner une couverture fine (10-100 μm) et flexible résistant à l'abrasion.

Il existe une douzaine de types d'émaux; citons:

- les oléorésineux (bon marché, Tmax = 105°C),
- les polyuréthanes (s'enlèvent facilement pendant la soudure, 130°C),
- les époxydes (résistants aux attaques chimiques, 130°C),
- le nylon (résiste à l'abrasion, 120°C),
- les polymères de polyvinyles formal-phénoliques tels que l'acétal de polyvinyle utilisé pour les

transformateurs immergés (emploi répandu à température modérée, 120°C),
- les polyesters et les polyesters modifiés (180°C),
- les polyimides (220°C)...
- les polyesterimides, préférés pour les appareils de type sec.

3.2 Les vernis

Les vernis sont obtenus par le produit de la réaction entre des huiles siccatives et des polymères naturels ou synthétiques dissous dans des solvants de basse toxicité (Tableau 3.1).

TABLEAU 3.1

Huiles siccatives	Polymères	
	Naturels	Synthétiques
Huile de lin	Asphalte	Polymères phénoliques
Huile de castor	Laque	Mélamine
Huile de bois	Copal	Alkydes
	Colophane	Epoxydes

On distingue:
- les vernis à base d'alkydes phénoliques (classe F) à usage répandu; ils résistent à l'humidité et possédant de bonnes propriétés thermiques; leur traitement est rapide et de coût modéré.
- les vernis à base d'époxydes (classes B - H), qui résistent aux agents chimiques.
- les vernis à base de silicones (classes H - C), ne peuvent pas être utilisés dans les machines tournantes hermétiques, à cause de l'usure provoquée par les quelques p.p.m. de vapeur de silicones qui se dégagent à ces températures dans l'air de refroidissement.
- les vernis à base d'oxyde de diphényle et les polyimides (classe C), utilisés à haute température sans usure.

3.3 Les résines

Ils existe deux familles de résines: les résines réactives liquides et les résines de moulage.

3.3.1 Les résines réactives liquides

Ce sont des polymères liquides dissous dans des solvants avec lesquels ils peuvent réagir; ils deviennent solides par le choix du traitement ou du catalyseur. On les appelle résines sans solvant (ou *solventless*) parce que le solvant est en même temps un coréactant, dont on n'a pas besoin de se séparer une fois le conducteur imprégné, ce qui exclut l'inclusion de bulles gazeuses dans l'isolation. Citons les familles suivantes de résines avec leurs températures maximales d'utilisation:

- Epoxydes liquides (130°C - 150°C)
- Uréthannes (130°C)
- Acryliques (130°C)
- Polymères de butadiène liquides (90°C)
- Silicones sans solvant (200°C)
- Polyesters non saturés dissous dans un monomère réactif tel que: styrène ou méthacrylate de méthyle (150°C).

Par le choix des composants des résines on peut obtenir des matériaux possédant une ou plusieurs des caractéristiques suivantes:

- faible viscosité.
- flexibilité à haute ou basse température.
- faible facteur de dissipation.

Les résines à faible viscosité sont utilisées pour l'imprégnation sous vide des équipements de haute tension. Les principaux avantages des résines sans solvant sur les résines conventionnelle sont:

- un meilleur remplissage, donc une meilleure résistance à l'humidité,
- une meilleure stabilité thermique,
- une température de fonctionnement plus basse grâce à un meilleur transfert de chaleur.

3.3.2 Les résines de moulage

Une résine de moulage est une combinaison d'une résine réactive liquide et d'un matériau d'apport inorganique. Les matériaux d'apport servent à abaisser le coefficient d'expansion thermique de l'isolant composite pour le rendre voisin du coefficient du conducteur; ils améliorent aussi le transfert de chaleur et font baisser le prix de l'isolation. Citons à titre d'exemple la résine époxyde moulée avec, comme matériau d'apport, l'alumine hydratée. Elle sert d'isolation à l'air libre et possède une bonne résistance à l'arc et à la décharge de surface.

3.4 Les matières moulés

Elles sont formées de polymères de synthèse de ce qu'on appelle plus communément "plastiques". Les plastiques se divisent en deux types principaux en fonction de leur processus de fabrication, de leurs propriétés et leurs utilisations: les *thermoplastiques* et les *thermodurcissables*.

3.4.1 Les thermoplastiques

Ce sont des polymères à structure linéaire faiblement ramifiée qui fondent sous l'effet de la chaleur et de la pression; le changement d'état sous l'effet de la température est plutôt physique que chimique. les thermoplastiques sont fabriqués par filage, moulage sous pression et par injection, moulage par soufflage, moulage par centrifugation, thermoformage.

Ils se ramollissent à partir d'une température déterminée, peuvent se dissoudre dans certains solvants et certains d'entre eux peuvent acquérir par l'incorporation d'adjuvants une souplesse variant dans d'assez larges limites.

La plupart des thermoplastiques ne peuvent pas être utilisés en-dessous de 60-80°C. Les rares thermoplastiques utilisés au dessus de cette température sont des exceptions (ex: le polytétrafluoréthylène,

PTFE, plus connu sous la dénomination commerciale de TEFLON, utilisé jusqu'à 200°C, qui n'est soluble dans aucun solvant organique). Les thermoplastiques avec apport de fibre de renforcement ont de meilleures propriétés mécaniques et thermiques.

3.4.2 Les thermodurcissables

Ce sont des polymères réticulés dont le réseau est à mailles serrées. Ils durcissent sous l'effet de la chaleur ou par l'action d'un catalyseur à la température ambiante et ils subissent un changement de structure chimique au cours de leur traitement. Après leur mise en forme, ils ne se ramollissent plus sous l'effet de la chaleur, deviennent pratiquement insolubles et offrent une bonne dureté. Ils sont utilisés combinés à des fibres de renforcement ou à des isolants inorganiques. Le tableau 3.3 donne quelques propriétés des thermodurcissables les plus utilisés.

3.4.3 Les caoutchoucs et les élastomères

Les élastomères sont des polymères faiblement réticulés, c'est-à-dire formant un réseau à mailles larges. Ils sont très utilisés en isolation électriques. Leur nom provient de leurs propriétés, qui sont celles du caoutchouc naturel (déformation plastique, vulcanisation nécessaire pour les solidifier).

Ils comportent des thermoplastiques principalement utilisés pour recouvrir les câbles et les manchons flexibles (ex: le PVC plastifié, de classe Y, les élastomère fluorés, de classe C, mais très chers).

TABLEAU 3.2

Propriétés de quelques thermoplastiques moulés.

	rigidité (kV/mm)	permit tivité à 50Hz à 10^3Hz à 10^3Hz	facteur de dissi- pation à 50Hz à 10^3Hz à 10^3Hz	résisti- vité (Ω-cm)	résis- tance à l'arc (sec)	masse volumique (g/cm^3)	tempéra- ture maxi. (°C)	conduc- tivité therm. (W/m°C)
polyacétal (Derlin)	18	3.8 = =	0.004 = =	10^{14}	129		85	0.28
acrylique (Plexiglass)	14	4.0 3.5 3.2	0.04 0.003 0.02	10^{14}			90	
acétate de cellulose	8	7.5 7.0 =	0.01 = =	10^{13}	200	1.3	105	0.41
polyamide (Nylon)	13	5.5 4.9 4.7	0.01 = 0.03	10^{13}	140	1.14	120	0.3
polycarbonate (Makrolon)	25	3.2 3 =	9x10^{-4} 0.002 0.01	10^{14}	120	1.2	138	0.23
polyéthylène (basse densité)	30	2.3 2.3 =	3x10^{-4} = =	10^{16}	140	0.93	100	0.41
polyéthylène (haute densité)	30	2.4 2.4 =	3x10^{-4} = =	10^{16}	200		138	0.63
polypropylène	18	2.6 2.6 =	5x10^{-4} = =	10^{14}	185	0.9	160	0.14
polystyrène	16	2.45 2.6 =	3x10^{-4} = 4x10^{-4}	10^{16}	80		80	0.15
polysulfone	16	3.1 = =	8x10^{-4} 10^{-3} 0.005	10^{17}	122		175	0.32
oxyde de polyphénylène	16	2.6 = =	4x10^{-4} = 9x10^{-4}	10^{13}	75			0.23

TABLEAU 3.3

Propriétés de quelques thermodurcissables moulés.

	produit de charge	rigidité (kV/mm)	permittivité	facteur de dissipation	résistivité (Ω-cm)	résistance à l'arc (sec)	masse volumique (g/cm^3)	température maxi. (°C)
			à 50Hz	à 50Hz				
			à 10^3Hz	à 10^3Hz				
			à 10^3Hz	à 10^3Hz				
phtallate	verre	10	4.3	0.01	10^{14}	180	1.78	180
de dillyle			4.3	0.004				
(DAP)			4.5	0.009				
	minéral	10	5.2	0.03	10^{13}	190	1.68	180
			5.3	0.03				
			4	0.02				
époxyde	verre	10	5	0.01	10^{14}	180	2.0	150
(Araldite)			=	=				
			=	=				
	minéral	10	5	0.01	10^{14}	190	2.0	150
			=	=				
			=	=				
phénolique	verre	9.5	13	0.05	10^{13}		1.45	180
(Bakélite)			9	0.04				
			6	0.03				
	amiante	7.8	50	0.1	10^{13}	120	1.9	180
			30	=				
			10	0.4				
polyester	verre	10	7.3	0.011	10^{13}	180	2.3	150
			4.68	=				
			6.4	0.008				
	minéral	9	7.5	0.009	10^{14}	150	2.3	150
			6.2	0.01				
			5.5	0.015				
silicone	verre	7.8	5.2	0.004	10^{14}	250	2.0	300
			5	0.0035				
			4.7	0.002				
	minéral	10	3.6	0.004	10^{14}	420	2.82	300
			=	=				
			6.3	0.002				
mélamine		7.8	9.5	0.03	10^{14}	180	1.52	100
α-cellulose			9.2	0.015				
			8.4	0.027				

TABLEAU 3.4

Propriétés des films isolants les plus utilisés.

	rigidité (kV/mm)	permittivité κ à 10^3Hz à 10^6Hz à 10^9Hz	facteur de dissipation à 10^3Hz à 10^6Hz à 10^9Hz	résistivité (Ω-cm)	résistance à la rupture (N/mm^2)	masse volumique (g/cm^3)	température maxi. (°C)	allongement (%)
PVC	20	6	0.7 0.04	10^{12}	35	1.5	90	200
polyéthylène	20	2.2	$3\,10^{-4}$	10^{16}	24	0.94	95	650
polypropylène	120	2.1	$3\,10^{-4}$	10^{16}	69	0.9	100	1000
acétate de cellulose	200	3.6 3.2	1.3 3.8 0.09	10^{13}	113	1.31	105	70
triacétate de cellulose	140	3.2 3.3 3.2	1.6 3.3 0.09	10^{15}	110	1.31	105	40
polyester téréphtalique	280	3.1 3 2.8	0.005 0.016 0.003	10^{18}	206	1.4	140	120
polytrifluoro-chloroéthylène	150	2.7 2.4 2.3	0.027 0.017 0.004	10^{18}	55	2.15	200	150
fluorocarbone (FEP)	200	2	$2\,10^{-4}$ $7\,10^{-4}$	10^{19}	21	2.15	200	300
tétrafluoro-éthylène (Teflon)	17	2.1	$2\,10^{-4}$	10^{18}	28	2.2	250	350
polyimide	280	3.5 3.4	0.003 0.010	10^{18}	172	1.42	400	70

Les élastomères thermodurcissables sont principalement:

- le caoutchouc naturel (ou isoprène) (70°C) obtenu par vulcanisation au soufre du latex d'hévéa.
- le styrène-butadiène (90°C).
- le butyle (120°C).
- le polybutadiène.
- le nitrile-butadiène (90°C).
- le polychloroprène (néoprène, 110°C).
- le polyéthylène chlorosulfoné (Hypalon, 120°C).
- les élastomères de silicones (250°C).

Les élastomères thermodurcissables sont utilisés dans les parties moulées et pour enrober certains instruments dont ils assurent l'étanchéité. Les élastomères ne supportent pas les basses températures: en dessous de -40°C ils deviennent généralement cassants.

3.5 Les films et les rubans

On utilise une vingtaine de sortes de films pour l'isolation électrique, mais peu d'entre eux connaissent un large emploi. Le tableau 3.4 présente quelques propriétés des principaux films utilisés dans l'industrie électrique.

3.6 Les iolants stratifiés

Les produits stratifiés sont formés par la superposition de deux ou plusieurs couches d'un matériau, constituées chacune d'un support fibreux (tissu) imprégné de résine thermodurcissable.

TABLEAU 3.5
Indices de température de quelques stratifiés (durée = 5 000 h, épaisseur = 1,6 mm)

Matériau			
Support	*Résine*	*Indice mécanique (Contrainte de rupture en flexion)*	*Indice électrique (Rigidité diélectrique)*
Papier	Phénolique	140	
Coton	Phénolique	135	130
Verre	Phénolique	190	160
Verre	Silicone	260	190
Verre	Epoxyde	153	152
Verre	Mélamine	150	
Papier	Epoxyde	128	
Amiante			

* L'indice de température pour une caratéristique donnée (mécanique ou électrique) est la température à laquelle le fonctionnement pendant un temps donné (ici 5 000 h) provoque une baisse de 50% de la valeur initiale de la caratéristique.

Les supports et les résines les plus utilisés figurent sur le tableau 3.5.

On obtient une grande variété de propriétés des produits stratifiés en jouant sur la combinaison des supports et des résines, en changeant la proportion de la résine par rapport au support, en utilisant des additifs, en arrangeant les empilements des couches (parallèles ou perpendiculaires), etc... Il est possible d'obtenir des stratifiés aux formes diverses (tubes, profilés...).

Les isolants stratifiés sont utilisés comme isolation de structure dans de nombreux équipements électriques (tableaux de commande, moteurs...). Les stratifiés plaqués cuivre sont utilisés pour les circuits imprimés, les plaques stratifiées (0,8 à 3,2 mm de papier/bakélite, papier/époxyde ou verre/époxyde) servent d'isolant et de support de structure tandis que la couche de cuivre (35 à 70 μm d'épaisseur) sert de conducteur.

3.7 Les papiers et les cartons

Cette dénomination désigne essentiellement la cellulose extraite du bois ou de l'alfa sous forme mince (papier, 5 à 200μm d'épaisseur), épaisse (carton, 0,2 à 6mm d'épaisseur) ou très épaisse (bois aggloméré). Le bois est surtout utilisé pour faire des cales isolantes (exemple: hêtre desséché). Les papiers sont en général imprégnés de diélectrique liquide pour éviter l'absorption d'eau qui abaisserait leurs qualités d'isolation. Ils sont utilisés (Tmax = 105°C) comme isolants dans les transformateurs de type sec et dans les condensateurs. Leurs propriétés dépendent de leur teneur en eau.

Rigidité:

50 à 80 kV/mm pour du papier bien sec.
100 kV/mm pour du papier imprégné d'huile.

Résistivité:

10^{17} Ω-cm pour une teneur en eau de 1%.
10^{12} Ω-cm pour une teneur en eau de 9%.
Leur constante diélectrique est de l'ordre de 6 à 7.

Il existe des papiers à base de fibres synthétiques, qui sont utilisés imprégnés d'huile ou d'askarel; ces papiers synthétiques ne possèdent pas la grande rigidité du papier de cellulose car il leur manque, entre autre, la structure fibreuse de la cellulose et sa capacité de piéger les ions. On utilise des papiers de mica; d'amiante ou de polyamides aromatiques comme isolants pour les moteurs et les transformateurs secs fonctionnant à haute température.

3.8 Les produits fibreux

On désigne par produits fibreux les matériaux constitués de fibres qui se présentent sous forme de cordes, fils, rubans, filets, tresses, nattes, tissus...

Les produits fibreux inorganiques sont les fibres de verre et l'amiante. Les fibres de verre (borosilicates, aluminosilicates) sont très utilisées quand elles sont exemptes d'alcalis; elles présentent l'avantage d'être bon marché tout en possédant une haute rigidité et une haute stabilité thermique.

L'amiante est un silicate naturel hydraté de calcium et de magnésium, à contexture fibreuse contenant 15% d'eau. La variété utilisée en électrotechnique s'appelle la "*chrysolite*". C'est une fibre soyeuse et d'une couleur qui va du blanc au vert. On l'utilise seule ou en combinaison avec une fibre organique mécaniquement plus solide. C'est un matériau hygroscopique et mauvais conducteur de la chaleur. L'amiante peut être tissée, cordée, ou utilisée en vrac au sein d'une résine pour former des matériaux isolants bon marché dont la tenue à la température est excellente.

Les produits fibreux organiques sont: le coton, la rayonne, le polyamide (Nylon), le polyester téréphtalique (Dacron, Tergal), les polyamides aromatiques (Nomex de Dupont de Nemours, Tmax = 200°C). On les utilise à l'état écru, ou imprégnés de résine (voir isolants stratifiés). La soie est chère, on l'utilise pour le guipage des fils employés dans les bobinages pour haute fréquence (entre 20 et 200 kHz).

3.9 Les produits micacés

Le mica est le nom générique de silicates naturels d'aluminium, de potassium ou de magnésium à structure lamellaire et à clivage très facile (des clivures de 30 μm sont courantes dans la technique des condensateurs). C'est un matériau flexible, qui résiste bien à l'arc et qui possède une rigidité élevée. Il est à la base de toutes les isolations des machines tournantes à haute tension. Les deux formes de mica les plus intéressantes sur le plan électrique sont:

- le mica muscovite, ou mica blanc, en provenance de l'Inde; c'est un matériau dur mais qui ne peut pas être au-dessus de 500°C, température qu-delà de laquelle il perd son eau de cristallisation et devient poudreux.
- le mica phlogopite, ou mica ambré, en provenance de Madagascar, qui peut supporter des températures de 800°C sans se décomposer.

Le mica blanc possède une rigidité élevée qui peut atteindre parfois 10^3 kV/mm. Elle n'est pas fonction linéaire l'épaisseur; on obtient E_c = 200 kV/mm pour des épaisseurs de l'ordre de 10 μm, et E_c = 40 kV/mm pour des épaisseurs de l'ordre du millimètre. Les propriétés moyennes du mica sont: rigidité: 600 kV/mm, permittivité: 6-7, résistivité: 10^{13} Ω-cm, facteur de dissipation: 2 10^{-3}.

Il existe d'autres matériaux inorganiques, le phosphate de bore ou le borophosphate de lithium par exemple, peuvent supporter des températures voisines de 800°C; on les utilise comme liant, en combinaison avec le mica, pour fabriquer des isolants micacés composites.

Le micalex est un produit artificiel préparé à partir de mica pulvérisé et de borate de plomb, porté à 750°C pour obtenir une vitrification.

On fabrique des papiers de mica par le même procédé que celui utilisé pour fabriquer les papiers de cellulose. Ces papiers sont fabriqués à partir de paillettes de mica ou à partir de la fluorophlogopite synthétique. Ils sont parfois combinés à des résines ou à des fibres de renforcement.

Les clivures de mica de grande surface étant rares et chères, on utilise des petites clivures qu'on répartit en couches successives avec recouvrement des bords et en les liant par un liant, souvent organique, qui dépend de la température d'utilisation. Un support isolant est

souvent utilisé pour donner une plus grande cohésion à l'isolation. Ce procédé est utilisé pour réaliser des feuilles souples de grandes dimension ou des rubans de grandes surfaces. On distingue dans cette famille les micanites, les micafoliums, les rubans micacés, ...

Ces feuilles, rubans ou stratifiés à base de paillettes de mica ont des qualités électriques inférieures à celles du mica, on les appelle micanites, elles ont une rigidité de l'ordre de 10 kV/mm et une température limite qui dépasse rarement 130°C.

Les produits micacés sont principalement utilisés comme entrelames de collecteurs, plateaux et sous-frettes d'induits et de rotors, manchons de collecteurs, et aussi dans les fours, les chauffes-eaux, les fers à repasser, les grille-pains, etc... Les micafoliums et les rubans micacés sont utilisés exclusivement pour l'isolation des bobinages haute-tension des machines tournantes pour lesquels ils sont considérés jusqu'à présent comme irremplaçables.

On fabrique des condensateurs de précision en utilisant des clivures de Ruby clair des Indes argentées sur les deux faces.

3.10 Les porcelaines et les céramiques

Le mot céramique vient du grec *keramos* (argile); les céramiques sont des solides à structures cristallines à base d'argile dont le type le plus pur est le kaolin. On lui ajoute des dégraissants (sable, quartz) et des fondants (feldspath, marne). Ce sont des corps complexes obtenus par cuisson à température élevée (1200-1400°C). Les porcelaines sont des silicates d'alumine. Les céramiques et la porcelaine sont utilisés comme isolants depuis longtemps en raison de leur qualités: bas prix, faible indice de perte, résistance thermique, durabilité dans l'atmosphère extérieure.

Les céramiques ont les propriétés limites suivantes:

- rigidité: 2 à 16 KV/mm,
- résistivité: 10^{10} Ω-m,
- permittivité: 4 à 15,
- indice de pertes à 1 MHz: 3.10^{-4} à 8.10^{-3},
- conductivité thérmique: 2 W/m°C,

Les céramiques de type mullite ($3Al_2O_3$-$2H_2O$) et alumine (Al_2O_3) sont utilisées pour fabriquer des bougies de moteur à explosion; elles supportent bien les contraintes thermiques et mécaniques.

La stéatite ($3MgO.4SiO_2.H_2O$, avec des agents fondants tels que feldspath, oxydes alcalins, alumine ou oxyde de plomb) est utilisée dans les applications en haute fréquence à cause des faibles pertes. Elle sert aussi à confectionner des supports d'éléments chauffants.

L'oxyde de béryllium (BeO) est toxique et coûteux mais il possède une conductivité thermique extrêmement élevée, comparable à celle des métaux. il est utilisé pour fabriquer des supports de résistances, des gaines de thermocouples, des embases de transistors, des boîtiers de semi-conducteurs ou des substrats de microcircuits.

En électronique et pour la confection des circuits intégrés, on utilise pour les substrats des céramiques qui possèdent un coefficient de dilatation thermique compatible avec l'élément qu'ils supportent. On trouve:

- Al_2O_3 pour les substrats des circuits hybrides et des interconnexion des circuits intégrés à basse et moyenne fréquences,
- SiO_2, Si_3N_4 pour les substrats des intercon-nexions en hyperfréquence,
- $2MgO.2Al_2O_3.5SiO_2$ (cordiérite) comme substrat d'interconnexion.

Les titanates de baryum, de strontium, de calcium ou de magnésium possèdent une permittivité élevée (de 15 à 1200); ils sont utilisé pour fabriquer des condensateurs céramiques.

TABLEAU 3.6
Différents types de condensateurs.

Type de condensateur	capacité volumique	prop. thermiques	permittivité	$tg\delta$	matériaux utilisée
type *I*	faible	coef. de temp. ajustable	< 500	< 0,4%	$TiO_2(MgO,CaO)$; $SrTiO_3(MgTiO_3)$; $MgTiO_3,CaTiO_3$
type *II*	forte	peu stable en F(T)	$500 < \kappa < 10\,000$	0,4 à 3%	$BaTiO_3(SrTiO_3$ et/ou $CaZrO_3$, $CaTiO_2$,Bi2SnO4); $BaTiO_2(BaSnO_3$ et/ou $PbTiO_3)$, pérovskite au plomb
type *III*	très forte			2 à 4%	$BaTiO_3(BaSnO_3,SrTiO_3)$; TiO_2(Ta,Ba,Nb...)

Les porcelaines sont utilisées aussi bien en basse qu'en haute tension (lignes de transport d'énergie, supports de fusibles, isolants en cas de température élevée...).

3.11 Les verres

Le verre est une substance minérale transparente et fragile à base d'oxyde de silicium, possédant une structure désordonnée qui facilite la migration des ions sodium lorsqu'ils y sont présents, ce qui en gégrade les propriétés diélectriques. Le verre se ramollit vers 675°C. Sur le plan électrique, il possède une bonne rigidité: 160 kV/mm (pour 2 cm d'épaisseur). A température élevée il devient presque conducteur: sa résistivité passe de 10^{10}-10^{17} Ω-cm (à 300°K) à 0,1 Ω-cm (à 1100°C). Les pertes diélectriques des verres varient en fonction de la fréquence. Le facteur de dissipation est de l'ordre de 0,02 à 10^3 Hz, il atteint un minimum de 0,01 à 10^7 Hz puis remonte rapidement à 0,02 à 10^{10} Hz. La rigidité du verre varie de 300 à 500 kV/mm. Dans les application en génie électrique la valeur 170 kV/mm donne une bonne marge de sécurité.

Le verre est utilisé en masse ou en fibres. Les fibres fabriquées par filage vers 1100°C, s'obtiennent soit par étirage mécanique soit par l'action d'un fluide (air, vapeur sous pression): les deux procédés des fibres avec un diamètre de l'ordre de 5 μm. Plus le diamètre des fibres est faible plus ils sont résistants à la traction. Des verres de plusieurs variétés sont utilisés comme isolant en électrotechnique, on distingue:

- *le verre sodocalcique*, peu utilisé en électrotechnique, sauf comme fibres de renforcement des isolants plastiques bon marché. Sa composition est la suivante:

  SiO_2: 65 à 75 %
  Na_2O: 8 à 17 %
  CaO et MgO: 7 à 22 %

Il possède une constante diélectrique de l'ordre de 7 à 8.

- *le verre aluminosilicaté* contient une très faible proportion d'ions alcalins, il est utilisé en hautes fréquences (tube émetteur) ou comme fibres de renforcement des isolants plastiques bon marché pour obtenir une résistance à la traction élevée.

- *le verre borosilicaté*, employé en masse pour fabriquer les isolateurs des lignes de télécommunication, ou en fibres dans la fabrication des circuits imprimés. Sa composition est la suivante:

SiO_2: 64 à 80 %
B_2O_3: 3.5 à 12 %
Na_2O et K_2O: 5 à 14 %

- *la silice pure fondue*, employée surtout pour sa transparence aux rayons ultraviolets. Elle est obtenue à partir de la fusion du sable blanc très pur ou à partir de la fusion dess cristaux de quartz. Le sable est utilisé en tant que produit de charge bon marché pour les produits de moulage. Les caractéristiques moyenne de la silice sont:

résistivité: 10^{12} à 10^{15} Ω-m,
constante diélectrique: 3 à 4,5 (de 50 à 10^5 Hz),
rigidité diélectrique: 5 à 15 kV/mm.

3.12 Les isolants pour câbles

Le schéma de la figure 3.1 montre la composition d'un câble servant au transport de l'électricité. Les différents éléments qui composent un câble sont indiqués ci-dessous.

1/ L'âme du câble est formée d'un conducteur (Cf. 1.8.2.2) qui peut être creux pour permettre la circulation d'huile de refroidissement dans le cas des câbles de haute tension.

2/ L'enveloppe isolante doit posséder de bonnes caractéristiques diélectriques:
- une résistivité élevée
- une bonne rigidité diélectrique
- un facteur de dissipation faible
- une bonne tenue au vieillissement
- une bonne résistance au froid, au chaud et au feu
- une insensibilité aux vibrations et aux chocs.

Elle peut être épaisse, très épaisse ou d'épaisseur normale. Elle est réalisée en divers matériaux isolants. On utilise en particulier pour la haute tension le polyéthylène, le polyéthylène réticulé ou le papier imprégné; pour la moyenne tension on peut utiliser le PVC ou l'élastomère d'éthylène propylène; pour la

basse tension on utilise le caoutchouc naturel ou les élastomères bon marché.

Dans la dénomination des câbles, les symboles suivants désignent les différents matériaux utilisés pour les enveloppes isolantes:

B butyle vulcanisé
C caoutchouc vulcanisé
C caoutchouc pur
E polyéthylène
J papier imprégné
N polychloroprène ou équivalent
R polyéthylène réticulé
V ploychlorure de vinyle (PVC)
X isolant minéral

3/ La gaine intérieure, qui est généralement confondue avec le bourrage.

4/ La gaine de bourrage est utilisée lorsque le câble comprend plusieurs conducteurs isolés les uns des autres; elle donne au câble une forme cylindrique. Les symboles suivants, utilisés pour la gaine de bourrage, désignent respectivement:

G matière élastique ou plastique
0 aucun bourrage
1 la gaine intérieure d'assemblage forme bourrage

5/ La gaine médiane, qui joue un rôle de revêtement interne recouvrant le bourrage généralement faite de PVC.

6/ La protection métallique qui forme un écran. On utilise les symboles suivant pour sa dénomination:

A aluminium
P plomb
F feuillards ou fils d'acier
Z zinc ou autre métal
T revêtement textile extérieur

Certains câbles comportent une protection mécanique supplémentaire ainsi composée:

7/ une gaine de séparation en PVC ou en papier enduit.

8/ une armure métallique en forme de feuillard ou de tresse.

9/ une gaine extérieure en PVC ou en élastomère.

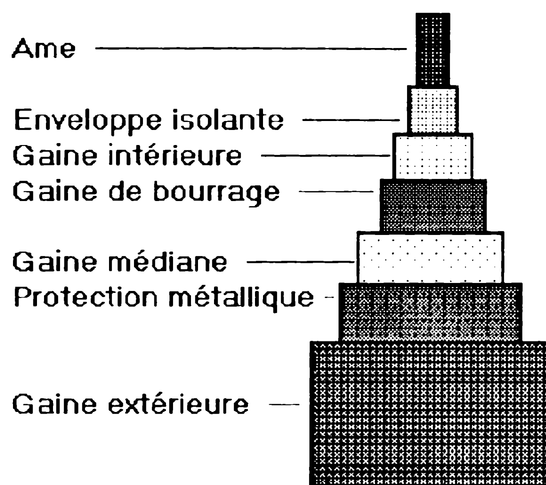


Fig. 3.1 Schéma d'un câble isolé servant au transport de l'énergie.

B- LES ISOLANTS LIQUIDES

Les isolants liquides sont utilisés dans des équipements tels que câbles haute tension, transformateurs, disjoncteurs, condensateurs, etc... Ou bien ils sont employés seuls, ou bien ils imbibent un isolant solide dont ils remplissent les vides. Ils présentent sur l'air l'avantage d'une plus grande rigidité et d'une meilleure conductivité thermique si bien que les équipements à isolant liquide sont moins volumineux que les équipements de type sec. Les liquides présentent sur les solides l'avantage de se régénérer spontanément après percement par claquage; s'il se forme une bulle d'air, elle migre vers le haut. Enfin, les liquides refroidissent par convection ou par évaporation les parties qui chauffent.

3.13 Les huiles minérales

Elles sont obtenues à diverses étapes de la distillation fractionnée du pétrole brut; les constituants non saturés sont ensuite éliminés par raffinage acide (acide sulfurique) ou par hydrogénation. On fait attention dans ces opérations de ne pas éliminer les hydrocarbures aromatiques (contenant le cycle benzène). Les composés aromatiques participent à la résistance à l'oxydation et absorbent facilement l'hydrogène naissant libéré lors d'une décharge électrique.

Les huiles minérales ont un facteur de dissipation de l'ordre de 0,1% et une constance diélectrique de l'ordre de 2,3. Elles dissolvent très peu de produits capables de donner naissance à des ions, si bien qu'elles conservent pendant un long fonctionnement un faible facteur de dissipation.

La rigidité des huiles minérales est sensible à l'humidité; elle peut aussi être affectée par différents autres facteurs: gaz dissous, forme des électrodes, température, pression, distance des électrodes... Elle est limitée par la formation sous contrainte électrique de bulles de gaz dont la rigidité et la permittivité sont

inférieures à celles du liquide; il se produit dans une bulle une concentration du champ électrique provoquant l'apparition d'une décharge. La décharge produit plus de bulles et il y a claquage de l'isolant.

La température d'utilisation des huiles minérales ne doit pas dépasser 120°C. Le défaut majeur des huiles minérales est leur tendance à l'oxydation aux températures élevées en présence d'oxygène. Elles deviennent alors acides et donnent des dépôts insolubles.

3.14 Les hydrocarbures chlorés

Ce sont des diélectriques polaires de pure synthèse, utilisés dans les installations intérieures telles que les transformateurs ou les condensateurs. On les désigne sous le nom générique d'*askarel.* Ils sont commercialisés sous des noms divers: pyralène, pyranol, apirolio, chlophen, arochlor, ineerten...

La définition des askarels est la suivante: ce sont des liquides isolants, ininflammables, qui ne dégagent pas de gaz inflammable ou explosif lorsqu'ils sont traversés par un arc électrique. Ils forment une catégorie de liquides que l'on peut diviser en trois groupes: les polychlorobiphényles (PCB), les polychlorophénylméthanes et les polychloroalcanes.

L'utilisation du pyralène (mélange contenant du PCB et du trichlorobenzène, TCB) est néanmoins interdite à cause des produits toxiques et non biodégradables qu'il dégage en cas d'explosion ou de fuite.

Cette interdiction a conduit à remplacer le PCB par des produits du groupe des polychlorophénylméthanes, le tétrachlorobenzyltoluène (TCBT) par exemple, en mélange avec les TCB. Le mélange à 60% de TCBT et 40% de TCB donne un liquide qui possède des propriétés physiques, chimiques et électriques analogues à celle du pyralène, en particulier une permittivité de 4,2 à 4,4 et un facteur de dissipation de 0,015.

Dans les condensateurs au papier imprégné, on utilise un mélange de chlorobiphényles (tri-, tetra- et pentachlorodiphényle), dont la permittivité dépend du pourcentage de chlore contenu dans la molécule (Fig. 3.2).

Les avantages des askarels sur les huiles minérales sont d'être:

- non inflammables,
- chimiquement plus stables (résistance à l'oxydation)
- de permettre la réduction du volume des condensateurs.

L'inconvénient majeur des askarels réside dans le fait que ce sont de bons solvants organiques, ce qui limite le nombre des matériaux avec lesquels ils peuvent être en contact et impose une purification avant toute utilisation.

3.15 Les liquides fluorocarbonés

Ce sont des huiles dont les molécules sont formées de chaînes carbonées où l'atome d'hydrogène est remplacé par un atome de fluor. Leur prix est très élevé, mais ils ont de très bonnes propriétés d'isolant, une grande rigidité, à l'état liquide ou gazeux; ils s'évaporent vers 100°C et ils ont une chaleur latente relativement élevée (21 cal/g); ils servent d'agents de refroidissement par évaporation. De plus, ils sont ininflammables et ils ont un faible pouvoir solvant, un faible facteur de dissipation et une bonne stabilité thermique (jusqu'à 400°C) avec une bonne résistance à l'oxydation.

3.16 Les huiles silicones

Les fluides silicones sont formés de molécules dans lesquelles les atomes de silicium et d'oxygène alternent dans une chaîne ou une boucle avec deux radicaux d'hydrocarbures (tels que méthyle CH_3 ou phényle C_6H_5) attachés à chaque atome de silicium.

Les huiles silicones les plus couramment utilisées sont des dimétyl-polysiloxanes. Ils sont disponibles en différentes viscosités (de 10 à 1000 centistokes). Ils sont auto-extinguible, ont un facteur de dissipation assez bas qui varie peu avec la fréquence, une bonne résistance à l'oxydation et une bonne résistance thermique (jusqu'à 200°C).

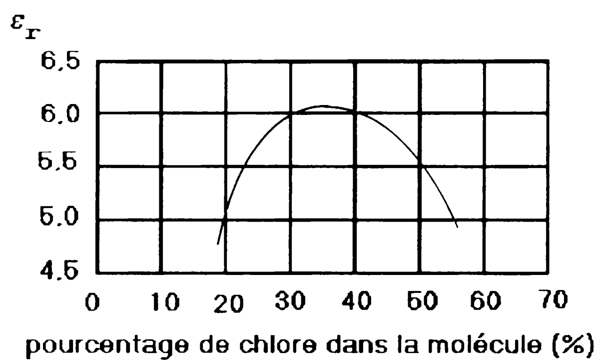


Fig 3.2: Variation de la permittivité relative des diphényles chlorés en fonction pourcentage du chlore dans la molécule.

C- LES ISOLANTS GAZEUX

Tous les gaz sont isolants à la température ambiante. L'air est l'isolant le plus utilisé en électricité, en tant que tel ou grâce à la porosité des isolants solides. A la pression atmosphérique et à la température ambiante, l'air assure l'isolation des lignes aériennes et il assure partiellement celle des moteurs.

Le tableau 2.5 résume les propriétés des gaz les plus utilisés. La permittivité relative de tous les gaz est voisine de 1 (à une décimale près). La rigidité, par contre, varie beacoup d'un gaz à l'autre, et elle augmente avec la pression et diminue avec la distance entre les conducteurs. La figure 3.4 donne la rigidité en fonction de l'épaisseur de l'air sous une pression de 1 atm.

L'hexafluorure le soufre SF_6 est très utilisé dans les disjoncteurs pour ses qualités d'extincteurs de l'arc électrique. C'est un gaz qui possède des propriétés très intéressantes: il est ininflammables et sa rigidité est 2,5 à 3 fois celle de l'air à la même pression. C'est pourquoi on l'utilise aussi dans les transformateurs à haute tension (figure 3.3). S'il est souvent soumis à des décharges partielles ou à un arc électrique, le SF_6 peut se dégrader et produit des composés hexofluorés (SOF_2, SO_2F_2, SOF_4, ...) ou fluorés (HF, CF_4, ...), plus ou moins agressifs.

Avant de recevoir leur liquide isolant, les transformateurs à huile minérale sont transportés remplis de gaz carbonique sous pression, plus léger que l'huile. A l'arrivée sur le lieu d'utilisation, ils sont remplis d'huile; le remplissage est effectué sous vide et après séchage. Les résidus le CO_2 se dissolvent facilement dans l'huile, la solubilité du gaz carbonique étant 10 fois plus importante que celle de l'air ou de l'azote à température ambiante. Cette grande solubilité évite la formation dans le liquide de bulles de gaz qui faciliteraient le claquage.

Pour éviter l'oxydation des huiles minérales de refroidissement contenues dans certains transformateurs

on remplit souvent d'azote sec l'espace situé au-dessus de l'huile.

L'hydrogène est le gaz dont la chaleur spécifique et la conductivité thermique sont les plus élevées. Ainsi il se place au premier rang des gaz pour le refroidissement des machines électriques de grande puissance malgré une rigidité plus basse que celle de l'air. Il est beaucoup moins visqueux que l'air et produit moins de frottement. Les grandes turbines de générateurs sont refroidies à l'hydrogène sous une pression de 3 atm ou plus. Cependant les systèmes de refroidissement à l'hydrogène sont très élaborés et ils demandent un entretien permanent, si bien que leur emploi ne se justifie que pour les très grosses machines. On est à l'abri des explosions tant que la concentration de l'hydrogène dans l'air (en cas de fuite) est inférieure à 10%.

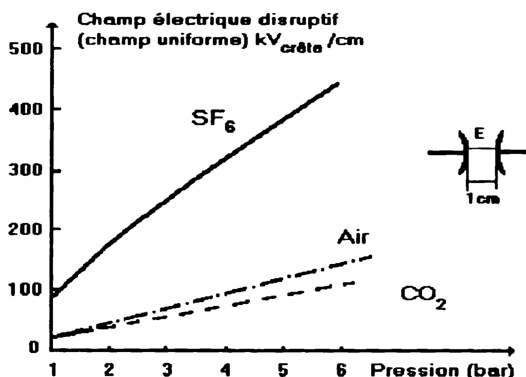


Fig. 3.3: Tenue diélectrique du SF_6 en champ uniforme.

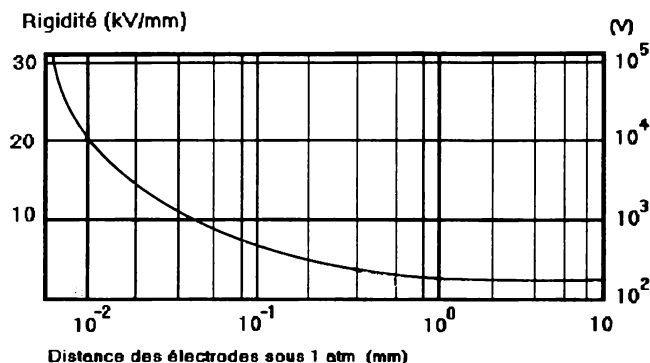


Fig. 3.4: Rigidité et tension de claquage de l'air sous une atmosphère en fonction de la distance entre les électrodes.

Les gaz à basse pression (P < 10^{-4} mm Hg) sont de très bons isolants puisque le libre parcours moyen des électrons est de l'ordre de la distance entre les électrodes et que les ionisations par collision sont donc très rares. La figure 3.4 montre la variation de la tension de claquage et de la rigidité en fonction de la distance entre les électrodes.

EXERCICES

3.1 Donner les avantages, les inconvénients et quelques applications des céramiques en tant qu'isolants.

3.2 Pourquoi le verre ordinaire est-il peu utilisé en électrotechnique? Donner l'utilisation la plus répandue des fibres de verre en isolation électrique.

3.3 Le polytetrafluoréthylène (Téflon) est un isolant thermoplastique exceptionnel. Donner ses propriétés et dire pourquoi il est appelé *plastique noble*.

3.4 Quelles sont les différences entre un thermoplastique et un thermodurcissable ?

3.5 Quelle est la propriété qui détermine le choix entre l'amiante et le coton en isolation électrique?

3.6 Les produits silicones sont utilisés sous forme solide et liquide.
a) Les silicones sont utilisés en isolation électrique en raison d'une caratéristique principale; laquelle?
b) Cette caractéristique provient d'une liaison chimique entre deux atomes; lesquels? Pourquoi cette liaison entraîne-t-elle la propriété?

3.7 Donner les propriétés essentielles de l'hexafluorure de soufre (SF_6) grâce auxquelles cet isolant est intéressant.

3.8 Soit un condensateur plan dont les plaques sont séparées par un millimètre d'air à la pression atmosphérique. On applique aux bornes du condensateur une tension de 3 kV; l'isolant claque.
1°) Expliquer le mécanisme intrinsèque de claquage.
2°) On augmente la pression de l'air entre les plaques. Expliquer Pourquoi l'isolant ne claque plus.
3°) On diminue la pression de l'air en dessous de la pression atmosphérique, l'isolant ne claque pas non plus. Expliquer pourquoi.

3.9 On se propose de monter une installation électrique.
a) L'installation comporte une protection sous la forme d'un fusible en zinc. Calculer le diamètre du fil qui permet de couper un courant I_n.
b) Pour plus de sécurité on installe un disjoncteur contenant un gaz qui a la particularité d'éteindre l'arc électrique. Nommer ce gaz et donner ses propriétés essentielles.
c) Quelle est l'utilisation de l'hydrogène dans les grandes turbines?

3.10 **1°)** Qu'est-ce qu'un thermoplastique ?
2°) Parmi les isolants thermoplastiques, le Téflon possède des propriétés exceptionnelles.
a) Indiquer sa formule ou sa dénomination chimique.
b) Indiquer les deux propriétés essentielles qui en font un thermoplastique différent des autres.

3.11 On compte isoler électriquement les différentes parties d'une machine électrique. Vous devez indiquer le genre d'isolant pour chaque partie, en donnant les explications nécessaires et en tenant compte du prix de la matière première. Cette machine comporte un moteur tournant à grande vitesse.
1°) Quelle isolation doit comporter le fil de bobinage du moteur si la température maximale de fonctionnement prévue est de 120°C et si le milieu où va fonctionner la machine est chimiquement agressif ?
2°) La machine comporte une résistance chauffante (300°C) du type thermocoax (fil chauffant dans une gaine métallique rigide, le fil étant séparé de la gaine par un isolant).

a) Indiquez quelle isolation on doit utiliser entre l'élément chauffant et la gaine métallique.
b) Les deux bouts du fil chauffant sont fixés sur la carcasse métallique de la machine. Quel isolant doit-on utiliser au niveau de cette fixation?
3°) La machine peut se déplacer et le câble d'alimentation peut subir des pliages répétés à l'endroit où il sort de la machine. Indiquez un matériau isolant qu'on peut utiliser pour éviter que le fil conducteur du câble ne casse à l'intérieur de l'isolant.

3.12 On compte fabriquer un appareil émetteur-récepteur utilisant une fréquence de quelques MHz. Vous devez déterminer, en réponse aux questions suivantes, les matériaux isolants utilisés dans les différentes parties, en tenant compte des propriétés électriques et du prix de revient de l'isolation.
1°) Les composants électroniques sont isolés les uns des autres par un isolant bon marché qui sert en même temps de support. Lequel? Donnez ses propriétés. (Un seul isolant répond à la question.)
2°) L'alimentation est fournie à partir d'un transformateur de type sec. Les matériaux isolants utilisés dans ce transformateur sont au nombre de trois (de trois familles différentes). Lesquels? Donnez leurs propriétés.
3°) A la sortie de l'appareil, le conducteur du câble d'alimentation risque de casser à l'intérieur de son isolation à cause des pliages répétés que subit le câble à chaque déplacement de l'appareil. Quel isolant organique supplémentaire faut-il utiliser, et de quelle manière, pour éviter la cassure?
4°) Le câble de l'antenne est de type coaxial. Le matériau qui sépare les deux conducteurs du câble est un thermoplastique. Pour le déterminer, fixer d'abord la propriété électrique qui guide votre choix, choisissez ensuite le matériau le moins cher. Justifiez votre choix.

3.13 Une isolation en silice de 5 mm d'épaisseur comporte une bulle d'hydrogène de deux millimètres d'épaisseur coincée dans la masse. (On a au total 3 mm de silice et 2 mm d'hydrogène.) L'isolation sépare deux conducteurs portés à des potentiels différant de 7,6 kV.
1°) Calculer le champ électrique dans la silice et dans l'hydrogène.
2°) Y a-t-il claquage dans la bulle d'hydrogène? Si la réponse est positive, y a-t-il danger de destruction complète de l'isolation?

3.14 Pourquoi le courant admissible est-il plus grand pour un conducteur isolé à l'amiante que pour un conducteur isolé au caoutchouc ?

3.15 Qu'est ce que le "pyranol"? Expliquer pourquoi il n'est plus utilisé dans les locaux fermé.

3.16 Donner deux raisons pour lesquelles on utilise les isolants liquides au lieu des isolants gazeux dans les transformateurs. Donner deux exemples d'isolants liquides et citer quelques unes de leurs propriétés.

3.17 Qu'est-ce qu'un isolant stratifié? Donner quelques exemples de matériaux utilisés pour confectionner des isolants stratifiés.

3.18 On compte fabriquer un sèche-cheveux dont les parties principales sont:
- un moteur à bobinage en cuivre attaché à un ventilateur, le tout formant le souffleur,
- une résistance chauffante portée par un support de forme conique,
- un boîtier,
- un fil d'alimentation.

Donner un nom d'isolant vraisemblable pour chaque partie.

4

Les matériaux magnétiques

4.1 Introduction

Toutes les matières réagissent magnétiquement quand elles sont plongées dans un champ magnétique.

Les matériaux diamagnétiques, dont les atomes ne possèdent pas de dipôle magnétique, réagissent au champ magnétique d'une façon négative. Le champ **B** à l'intérieur de ces substances est inférieur au champ extérieur $\mathbf{B}_0$.

Les matériaux paramagnétiques possèdent des dipôles magnétiques au niveau atomique, ionique ou moléculaire, qui s'orientent continuellement d'une manière aléatoire en l'absence de champ magnétique extérieur $\mathbf{B}_0$. Sous l'effet d'un champ extérieur, ils s'orientent pour s'aligner dans le même sens. Leur réaction est positive et le champ **B** à l'intérieur de ces substances est supérieur au champ extérieur $\mathbf{B}_0$; il s'annule quand $\mathbf{B}_0$ s'annule.

Les matériaux ferromagnétiques, antiferromagnétiques, ou ferrimagnétiques, possèdent une propriété magnétique de couplage entre les différents dipôles

individuels, qui apparaît lorsque les atomes sont associés dans un même solide. L'interaction d'échange est positive dans le cas des ferromagnétiques (les dipôles égaux pointent dans le même sens), négative et positive dans le cas des antiferromagnétiques (les dipôles égaux pointent dans deux sens opposés) et des ferrimagnétiques (deux dipôles inégaux pointent dans deux sens opposés). Le champ magnétique **B** à l'intérieur d'un matériau ferromagnétique est très supérieur au champ extérieur $\mathbf{B}_0$ (Fig.4.10).

Le diamagnétisme et le paramagnétisme sont des propriétés dues aux atomes, aux ions ou aux molécules individuels. Le ferromagnétisme, l'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme sont des phénomènes dus à la coopération d'un groupe d'atomes.

4.2 Le dipôle magnétique

Le dipôle magnétique se trouve à la base des propriétés magnétiques des substances. Un dipôle magnétique est caractérisé par les lignes de champ de son vecteur induction magnétique **B**; ces lignes de champ entrent d'un côté du dipôle et sortent de l'autre (Fig.4.1). Exemples de dipôles magnétiques: une barre aimantée, une spire parcourue par un courant électrique, un solenoïde parcouru par un courant, etc...

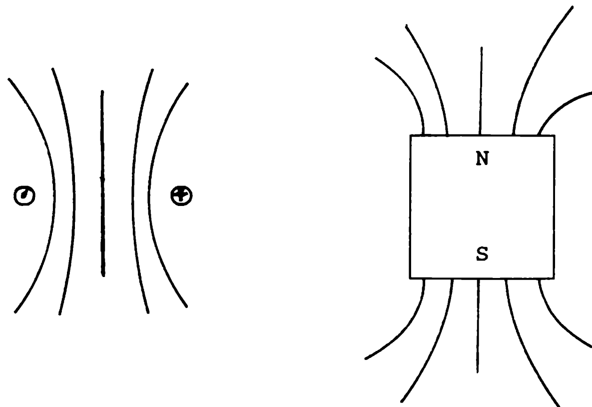


Fig.4.1: Dipôles magnétiques: une spire parcourue par un courant et une barre aimantée.

L'exemple de dipôle magnétique le plus simple est une spire de surface S, parcourue par un courant *i*; elle est représentée symboliquement par un vecteur **p** (le moment dipolaire magnétique) situé au centre de la spire, dont le sens est déterminé par la règle du tire-bouchon. La valeur de ce moment est *i*S (A.m²).

On peut mesurer le moment dipolaire magnétique d'un dipôle magnétique quelconque en le plaçant dans un champ **B** et en mesurant le moment **M** du couple de forces auquel il est soumis:

$$\mathbf{M} = \mathbf{p} \times \mathbf{B}. \quad (4.1)$$

Toutes les tentatives d'isoler les "pôles" d'un dipôle magnétique ont échoué jusqu'à présent.

D'un point de vue classique, l'électron peut être vu comme une sphère chargée qui tourne autour d'un axe passant par son centre. La charge qui tourne est alors assimilée à une spire possèdant un moment dipolaire de spin p_s. Le même électron, qui tourne autour du noyau, est assimilé à une spire possèdant à son tour un moment dipolaire magnétique, appelé moment orbital p_l. Ces approximations ne sont pas éloignées de la réalité et les moments p_s et p_l se calculent grâce à la physique quantique.

L'action d'un champ magnétique sur un corps est déterminée par le caractère du mouvement des charges électriques que contient ce corps, leur trajectoire et leur vitesse. Toutes les matières jouissent de propriétés magnétiques qui apparaissent quand ces matières sont plongées dans un champ magnétique.

4.3 Notions de base

Les deux grandeurs macroscopiques importantes en magnétisme sont *le champ magnétique* **H** et *le champ d'induction magnétique* **B**. Le champ **H** satisfait au théorème d'Ampère: la circulatioon de **H** le long d'une courbe fermée est égale à la somme algébrique des courants réels qui traversent une surface quelconque s'appuyant sur cette courbe:

$$\int \mathbf{H.dl} = \sum i. \qquad (4.1)$$

Le vecteur **B** est défini par son action sur une charge électrique q se déplaçant à la vitesse **v**:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v}x\mathbf{B}. \qquad (4.2)$$

et par le fait que son flux est consevatif:

$$\text{div}\mathbf{B} = 0 \qquad (4.3)$$

H s'exprime en A/m ou en oersted (1 Oe ≈ 80 A/m). **B** s'exprime en gauss ou en tesla (1 T = 10^4 G).

Soit un solenoïde infiniment long, parcouru par un courant *i*. Le champ d'induction magnétique à l'intérieur du solenoïde est:

$$B_o = \mu_o.n.i \qquad (4.4)$$

où n est le nombre de spires par mètre et $\mu_o = 4\pi\ 10^{-7}$ Tm/A est la perméabilité magnétique du vide. Si on remplit le solenoïde d'un matériau donné, ce matériau s'aimante sous l'effet de $\mathbf{B}_o$ et il crée son propre champ intérieur **B'** qui se superpose au champ extérieur. Le champ total est:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_o + \mathbf{B'}. \qquad (4.5)$$

B' dépend des propriétés magnétiques du matériau et il est proportionnel à $\mathbf{B}_o$:

$$\mathbf{B'} = \chi\,\mathbf{B}_o, \qquad (4.6)$$

où χ (khi) est la susceptibilité magnétique du matériau, qui peut être positive ou négative, faible ou importante.

On a alors:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_o + \chi\,\mathbf{B}_o = (1 + \chi)\,\mathbf{B}_o. \qquad (4.7)$$

$(1 + \chi)$ s'appelle la perméabilité relative du milieu; c'est une grandeur sans dimensions, notée μ. On l'appelle aussi parfois constante magnétique et on la note alors κ_m. On écrit donc:

$$\mathbf{B} = \mu\, \mathbf{B}_o. \tag{4.8}$$

Or

$$\mathbf{B}_o = \mu_o\, \mathbf{H}, \tag{4.9}$$

où **H** est le champ magnétique; donc:

$$\mathbf{B} = (1 + \chi)\, \mu_o\, \mathbf{H} = \mu\, \mu_o\, \mathbf{H} \tag{4.10}$$

$$\mathbf{B} = \mu_o\mathbf{H} + \mu_o\chi\mathbf{H} = \mu_o(\mathbf{H} + \mathbf{M}). \tag{4.11}$$

L'aimantation d'une substance est évaluée par le moment magnétique **M** de son unité de volume, qui est le moment magnétique résultant de tous les moments dipolaires magnétiques des molécules, atomes et électrons contenus dans ce volume.

$$\mathbf{M} = \sum \mathbf{p}/V. \tag{4.12}$$

Ce vecteur **M**, appelé aussi intensité d'aimantation de la substance, est lié au champ magnétique **H** par la relation:

$$\mathbf{M} = \chi\mathbf{H}. \tag{4.13}$$

Un moment magnétique est toujours un multiple entier d'un moment magnétique unitaire m_B appelé magnéton de Bohr:

$$m_B = \mu_o eh/(4\pi m) \tag{4.14}$$

$$m_B = 9{,}273.10^{-24}\text{Am} = 1{,}165.10^{-29}\text{Wbm} \tag{4.15}$$

On définit aussi le vecteur polarisation magnétique **I** par la relation:

$$\mathbf{B} = \mu_o\mathbf{H} + \mathbf{I}. \tag{4.16}$$

4.4 Le paramagnétisme

Dans les matériaux paramagnétiques les effets magnétiques des électrons ne s'annulent pas entre eux. Les atomes qui forment ces matériaux ont un moment dipolaire magnétique **p** non nul et l'orientation des dipôles est aléatoire. Ex: les éléments de transition, les terres rares, les actinides.

Soit un échantillon de matériau paramagnétique contenant N atomes. Si l'on plonge cet échantillon dans un champ magnétique, les dipôles tendent à s'aligner dans le sens du champ puisque l'énergie potentielle d'un dipôle de moment **p** est

$$W = -\mathbf{p}.\mathbf{B} \tag{4.17}$$

et qu'elle est minimale pour un angle nul entre **p** et **B**.

Pour un alignement parfait, le moment global de l'échantillon est $N\mathbf{p}$. Mais l'agitation thermique empêche l'alignement parfait. On a alors à comparer deux grandeurs; l'une, $3/2kT$, qui est l'énergie cinétique moyenne (de vibration ou de translation, s'il s'agit respectivement d'un solide ou d'un fluide à la température T) et l'autre, $2pB$, qui est la différence d'énergie entre un dipôle magnétique aligné sur le champ **B** et un dipôle pointant dans le sens contraire. L'énergie cinétique est très importante pour les champs ordinaires et l'échantillon acquiert en fait un moment global largement inférieur à $N\mathbf{P}$. L'intensité d'aimantation des corps paramagnétiques suit la loi de Curie:

$$\mathbf{M} = C\,\mathbf{B}/T, \tag{4.18}$$

où C est une constante. Cette loi est vérifiée expérimentalement pour les valeurs de B/T inférieures à 5000 gauss/°. L'aimantation a une limite supérieure M_{max} qui correspond à l'alignement total des moments dipolaires élémentaires contenus dans une unité de volume du matériau paramagnétique: $M_{max} = Np/V$.

Placé dans un champ magnétique non uniforme, par exemple dans la région voisine d'un pôle d'aimant, un matériau paramagnétique de forme quelconque se déplace dans le sens de la croissance de la densité des lignes de champ, c'est-à-dire qu'il est attiré par l'aimant quel que soit le pôle qui lui fait face.

Un matériau paramagnétique de forme allongé, placé dans un champ magnétique uniforme, subit un couple de forces qui le fait tourner pour le coucher parallèlement aux lignes de champ.

Sont paramagnétiques la plupart des gaz, certains métaux, en particulier les métaux alcalins, quelques sels, les matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques lorsqu'ils sont chauffés au-dessus d'une certaine température appelée *température de Curie*. Le tableau 4.1 donne la susceptibilité de quelques matériaux paramagnétiques.

TABLEAU 4.1
Quelques matériaux paramagnétiques et leur susceptibilité.

matière	χ (x10^{-6})	matière	χ (x10^{-6})
Na	8	Pt	293
Al	21,4	FeCl	2500
Mn	870	Va	370
Ta	180	Mg	12
W	180	Y	110

4.5 Le diamagnétisme

Le diamagnétisme est une propriété inhérente à toutes les substances, mais il est masqué dans les substances dont les atomes possèdent un moment dipolaire magnétique, telles que les substances paramagnétiques ou ferromagnétiques.

Un corps diamagnétique placé dans un champ magnétique non uniforme est attiré dans le sens de la

décroissance de la valeur absolue du champ (il est repoussé par le pôle d'un aimant).

Un corps diamagnétique allongé, placé dans un champ magnétique uniforme, subit un couple de forces qui le fait tourner pour le placer perpendiculairement aux lignes de champ.

Les substances diamagnétiques ont une susceptibilité magnétique négative et de faible amplitude. le tableau 4.2 donne la susceptibilité de quelques matériaux.

TABLEAU 4.2
Quelques matériaux diamagnétiques et leur susceptibilité.

matière	χ (x10^{-6})	matière	χ (x10^{-6})
H_2O	-8,8	CO_2	-5,3
Bi	-167	Ag	-26,4 1

Pour comprendre le diamagnétisme il faut étudier l'effet d'un champ magnétique sur les charges mobiles des atomes ou des molécules qui forment la substance.

Soit un électron qui tourne autour d'un noyau avec une vitesse angulaire ω faisant un angle quelconque avec un champ extérieur **B** (Fig.4.2). On décompose cette vitesse angulaire en deux vitesses, l'une, ω_1, dirigée parallèlement à B et l'autre, ω_2, dirigée perpendiculairement à **B**.

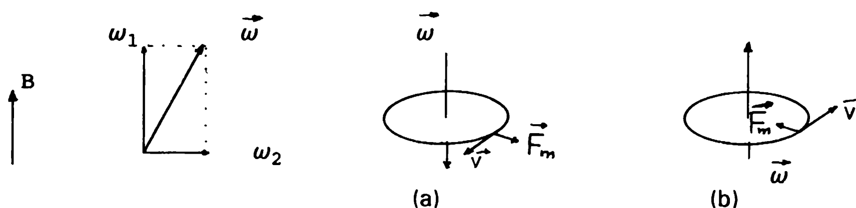


Fig.4.2: Trajectoires électroniques dans un champ magnétique et forces provoquées par ce champ.

L'effet du champ sur l'électron de vitesse angulaire ω_2 est un couple de forces qui tend à ramener ω_2 sur ω_1.

Globalement, dans un solide, l'effet du champ sur toutes les orbites électroniques de vitesse angulaire ω_2 perpendiculaire au champ B est nul.

Restent les orbites parallèles, au champ B (ω_1 ou ω_1). Sur la figure 4.2 on a schématisé deux orbites *a* et *b*. Sur l'orbite *a*, l'électron est soumis à une force $\mathbf{F_m}$ perpendiculaire à sa vitesse (et au champ **B**) dont la valeur est:

$$Fm = evB = e\omega rB \qquad (4.19)$$

qui a un sens contraire au sens de la force centripète $\mathbf{F_c}$.

Sur l'orbite *b*, cette force $\mathbf{F_c}$ est de même sens que la force centripète $\mathbf{F_c}$. En appliquant la loi fondamentale de la dynamique on obtient:

$$\sum \mathbf{F} = m\gamma \qquad (4.20)$$

$$F_c \pm F_m = mc = m\omega^2 r. \qquad (4.21)$$

Or

$$F_c = m\omega^2{}_o r \text{ et } F_c = e\omega rB \qquad (4.22)$$

Donc

$$m\omega^2{}_o r \pm e\omega rB = m\omega^2 r \qquad (4.23)$$

et

$$\omega^2{}_o \pm (eB/m)\omega - \omega^2 = 0. \qquad (4.24)$$

En utilisant le fait - non démontré ici - que ω n'est pas très différent de ω_o, on peut écrire:

$$\omega = \omega_o \pm \Delta\omega\ , \qquad (4.25)$$

ce qui nous donne après simplification:

$$\Delta\omega = \pm\, eB/2m. \qquad (4.26)$$

L'effet d'un champ magnétique est donc d'augmenter ou de diminuer la vitesse angulaire des électrons autour du noyau (selon le sens de rotation par rapport au sens du champ). Il en résulte que le moment dipolaire orbital de l'électron croît ou décroît.

Les moments orbitaux des deux électrons a et b s'annulent en l'absence de champ magnétique. Sous l'effet du champ, le moment orbital de l'électron *a* diminue alors que celui de l'électron *b* augmente et la somme des deux moments n'est plus nulle. Pour calculer cette somme, on utilise le moment orbital d'un électron de charge e, de vitesse angulaire w et de rayon r:

$$p = \tfrac{1}{2}\, er^2\omega. \qquad (4.27)$$

La croissance (ou la décroissance) de ce moment sous l'effet de B est:

$$\Delta p = \tfrac{1}{2}\, er^2\Delta\omega \qquad (4.28)$$

$$\Delta p = \pm\, e^2Br^2/4m. \qquad (4.29)$$

Δp peut être vu comme un moment orbital induit par le champ extérieur **B**; il est dirigé dans le sens contraire à **B**. Il en résulte une aimantation du corps diamagnétique, qui a pour valeur:

$$\mathbf{M} = \sum \Delta\mathbf{p}/V; \qquad (4.30)$$

où *V* est le volume du corps. Cette aimantation qui est dirigée dans le sens contraire de **B**, explique le diamagnétisme.

4.6 Le ferromagnétisme

Il existe cinq éléments simples ferromagnétiques, trois d'entre eux sont des éléments de transition: le fer (Fe),

le nickel (Ni) et le cobalt (Co), et deux des terres rares: le gadolinium (Gd) et le dysprosium (Dy). Les alliages qui les contiennent sont ferromagnétiques, ainsi que certains autres alliages, par exemple le cuivre-manganèse.

Lorsque les atomes s'allient pour former un solide ferromagnétique, les moments magnétiques de spin des électrons périphériques d'atomes voisins s'ordonnent en s'orientant dans la même direction malgré l'agitation thermique qui tend à s'opposer à cet ordre.

La susceptibilité des ferromagnétiques est plusieurs milliers de fois plus élevée que celle qui résulte de tout autre type de magnétisme.

A chaque matériau correspond une température critique T^c, appelée température de Curie, au-dessus de laquelle le matériau est paramagnétique. La température de Curie du fer est de 770°C, celle du nickel est de 358°C, celle du cobalt est de 1131°C et celle du gadolinium est de 16°C. Les alliages d'un métal ferromagnétique avec un métal non ferromagnétique possèdent une température de Curie plus faible que celle du ferromagnétique pur.

Dans les matériaux ferromagnétiques il existe une interaction entre les atomes voisins, qui s'appelle le *couplage d'échange*. Sous l'effet de cette interaction les atomes voisins se disposent de sorte que leurs dipôles magnétiques aient un parallélisme rigide. Le couplage d'échange est une notion quantique; on sait grâce à elle que seuls les cinq éléments cités plus haut sont ferromagnétiques. En effet ces éléments ont la particularité de présenter une couche électronique non complètement remplie, correspondant au nivau 3d pour les trois premiers, et 4f pour les deux autres.

4.7 Les domaines ferromagnétiques

Sans intervention extérieure, l'alignement des dipôles magnétiques des atomes voisins dans les matériaux ferromagnétiques se produit dans de petites régions appelées *domaines de Weiss*. Ces domaines sont séparés par des parois appelées *parois de Bloch* (Fig. 4.3).

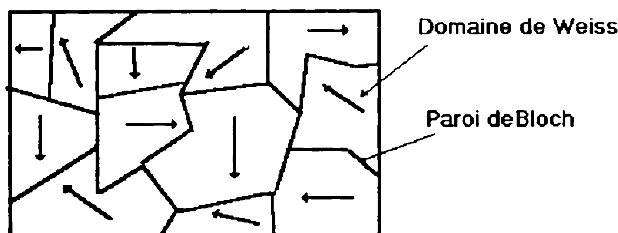


Fig. 4.3: Domaines de Weiss et parois de Bloch dans un échantillon ferromagnétique quelconque.

L'énergie W_{im} associée à la structure constituée des domaines est la sommes de quatre termes:

$$W_{im} = W_{ec} + W_{ms} + W_{an} + W_{mt} \qquad (4.31)$$

Nous expliquons la signification de chacun de ces termes dans les paragraphes suivants.

4.7.1 Energie d'échange W_{ec}

L'*énergie d'échange* est l'énergie d'interaction entre deux moments magnétiques atomiques (ou moléculaires) voisins dans un solide. On peut la calculer grâce à la mécanique quantique. Elle dépend de la distance et des directions relatives des deux moments et elle est minimale quand tous les dipôles atomiques d'un cristal sont alignés dans le même sens. C'est elle qui est à l'origine du phénomène du ferromagnétisme.

4.7.2 Energie magnétostatique w_{ms}

Considérons la figure 4.4a qui représente un solide ferromagnétique en forme de parallélipipède dont tous les dipôles sont orientés dans le même sens. Les lignes de force indiquent le sens du champ magnétique produit par ce solide et leur densité indique son intensité. Ce champ est capable de déplacer une barre de fer et le déplacement est une dépense d'énergie; il est d'autant

plus grand et plus rapide que le champ est intense. Les lignes de force indiquent donc la présence d'une énergie potentielle dans l'espace environnant le solide. Cette énergie potentielle s'appelle l'*énergie magnétostatique*.

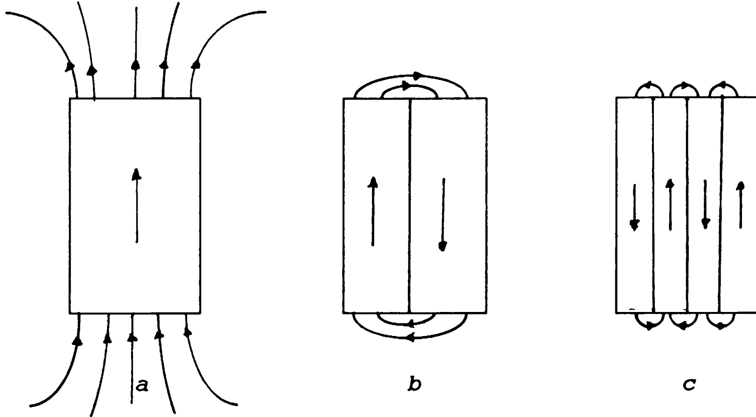


Fig. 4.4: Lignes de champ autour d'une barre aimantée pour différentes dispositions des domaines magnétiques.

Si on consdère (Fig. 4.4b) le parallélipède divisé en deux domaines où les dipôles sont orientés en sens opposé; la densité des lignes de champ à l'extérieur du parallélipipède est plus faible que dans le cas précédent, de même que l'énergie magnétostatique W_{ms}. La figure 4.4c représent le parallélipipède divisé en quatre domaines, et son énergie magnétostatique W_{ms} est encore plus faible.

4.7.3 Energie magnétocristalline W_{an}

C'est l'énergie qui est due à l'anisotropie magnétique d'un monocristal de matériau. En effet, l'énergie nécessaire pour orienter les dipôles magnétiques est différente suivant la direction. Dans le cas du fer, Par exemple, dont le réseau cristallin est cubique, les directions de magnétisation facile sont les directions <100>, <010> et <001> (Fig. 4.5 et 4.6). Dans le cas du nickel, dont le réseau est également cubique, les directions privilégiées sont la direction <111> et les directions analogues. L'*énergie magnétocristalline* (ou énergie due à l'anisotropie) W_{an} est proportionnelle à

l'énergie d'aimantation, elle est minimum lorsque le cristal est aimanté suivant sa direction d'aimantation facile.

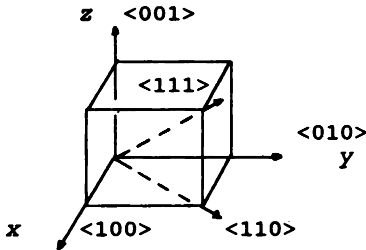


Fig. 4.5: Maille cubique du fer.

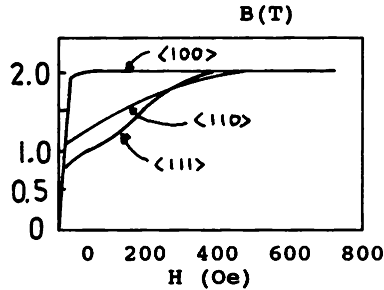


Fig.4.6: Courbe de première aimantation du fer en fonction de l'axe cristallographique.

Lorsque il y a deux directions d'aimantation facile perpendiculaires, la minimisation de l'énergie W_{an} est provoquée par la création des domaines de fermeture en forme de triangles (Fig. 4.7a), ce qui ajoute une nouvelle énergie, l'*énergie magnétostrictive.*

4.7.4 Energie magnétostrictive W_{mt}

Lorsqu'on aimante un matériau ferromagnétique il change de longueur. Le fer s'allonge ($\approx$ 20 ppm); on dit qu'il a une énergie magnétostrictive (ou magnétoélastique) positive. Le nickel diminue de longueur ($\approx$ 50 ppm); le cobalt également; on dit qu'ils ont une énergie magnétostrictive négative. Dans le cas du fer, les triangles de fermeture tendent à s'allonger, ainsi que les parties longitudinales, ce qui provoque une déformation plastique du matériau. W_{mt} est le résultat de cette déformation plastique; elle est proportionnelle aux domaines de fermeture. Pour que cette énergie soit minimisée, il faut que les domaines soient disposés comme sur la figure 4.7b.

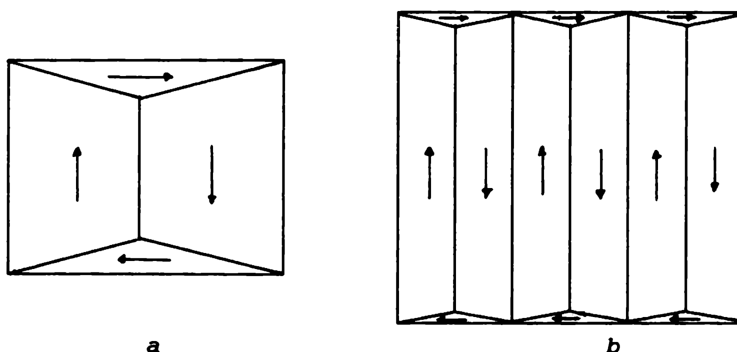


Fig. 4.7: Domaines de fermeture dans un matériau ferromagnétique. La disposition de la figure *b* minimise toutes les énergies qui interviennent dans l'arrangement des domaines.

4.8 Cycle d'hystérésis

La dimension des domaines de Bloch est variable; dans certains cas on peut les voir sous un microscope ordinaire. A l'intérieur d'un même domaine tous les dipôles sont orientés dans la même direction et le champ **B** y est très intense. Dans le cas général, les différents domaines d'un échantillon ferromagnétique sont orientés dans toutes les directions et le champ global est nul. Lorsque les domaines sont orientés suivant une direction privilégiée, l'échantillon est un aimant.

Lorsqu'on applique un champ magnétique **H** à un matériau ferromagnétique, les parois de Bloch se déplacent pour privilégier la direction du champ. La taille des domaines dont les dipôles sont orientés dans la direction du champ augmente aux dépens de celle des autres domaines. Si le champ **H** augmente suffisamment le matériau tout entier sera formé d'un seul domaine, dont les dipôles seront orientés dans la même direction que le champ. L'induction magnétique **B** sera alors égale à sa valeur de saturation $\mathbf{B}_s$. La courbe qui relie le champ induit **B** au champ extérieur **H** est appelée la *boucle d'hystérésis* du matériau (Fig.4.8a). Lorsqu'on annule le champ extérieur **H**, le champ **B** ne s'annule pas et reste égal à une valeur $\mathbf{B}_r$, appelée *induction*

rémanente. Pour réduire le champ B à zéro, il faut appliquer un champ **H** négatif égal à H_c appelé *champ coercitif.*

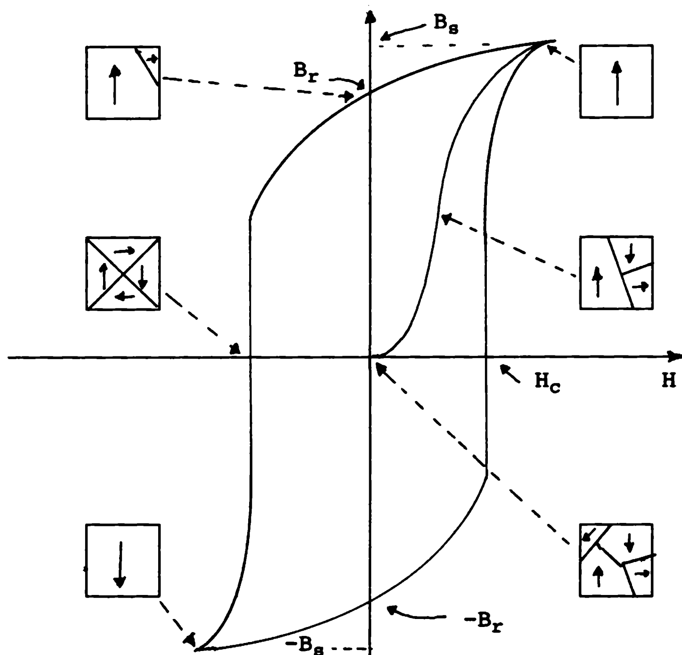


Fig.4.8a: Boucle d'hystérésis. B_s est le champ d'induction de saturation, B_r le champ d'induction rémanent et H_c le champ magnétique coercitif.

La surface de la boucle d'hystérésis représente l'énergie perdue lors du déplacement irréversible des parois de Bloch. Toute résistance au déplacement de ces parois augmente la surface de la boucle. Tout agent qui freine ou gêne le mouvement de ces parois augmente les pertes d'énergie par hytérésis, ces pertes deviennent génantes quand le champ **H** appliqué est alternatif. Elle sont intéressantes au contraire quand il s'agit de fabriquer un aimant permanent dont la désaimantation doit être difficile. Trois facteurs gênent le mouvement des parois de Bloch; ce sont les joints de grains, les précipités de seconde phase et l'orientation cristalline.

4.8.1 Les joints de grains

Les joints de grains sont des parois naturelles des domaines magnétiques. Chaque joint de grain est une frontière entre deux grains monocristallins adjacents ayant des orientations cristallines différentes. Il est évident que les parois de Bloch qui correspondent à des joints de grains sont très difficiles à déplacer; il est donc plus d'aimanter un solide ferromagnétique lorsqu'il est monocristallin et d'en faire un seul domaine magnétique que lorsqu'il est polycristallin. Les défauts cristallins (en particulier les dislocations dues à l'écrouissage) sont également un siège privilégié des parois de Bloch et gênent le déplacement de ces parois.

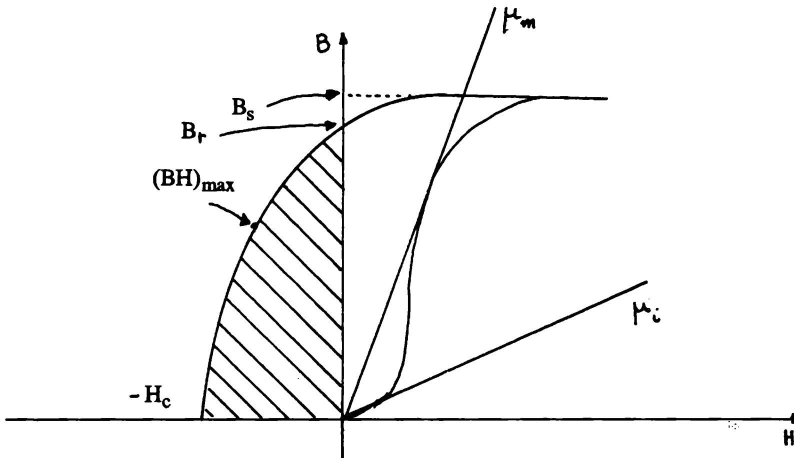


Fig. 4.8b: Courbe de première aimantation et de désaimantation d'une substance ferromagnétique. On y voit les différentes perméabilités. La surface hachurée représente l'énergie de désaimantation. Le rapport B/H est la perméabilité. μ_m représente la perméabilité maximale et μ_i la perméabilité initiale.

4.8.2 Les précipités de seconde phase

Les impuretés chimiques non magnétiques forment des précipités qui gênent le déplacement des parois de Bloch. Les précipités de seconde phase sont employés pour fabriquer les aimants permanents à fort champ

rémanent B_r. On utilise en général un alliage composé de deux précipités, l'un ferromagnétique et l'autre non ferromagnétique, qu'on réduit d'abord en poudre. La poudre subit une pression et un frittage sous fort champ magnétique. La phase non ferromagnétique forme la matrice et la phase ferromagnétique forme une grande quantité de domaines de Weiss tous orientés dans le même sens.

4.8.3 L'orientation cristalline

Comme on l'a vue au § 4.7.3, il existe des directions de plus facile aimantation. La surface du cycle d'hystérésis est minimisée pour un champ **H** ayant le même sens qu'une direction d'aimantation facile. L'effet de cette propriété est très important dans les tôles de transformateur qui subissent continuellement un champ magnétique alternatif. L'orientation des grains de la tôle dans une autre direction que celle du champ engendre des pertes par hystérésis qui se traduisent par un échauffement néfaste. Depuis les années 30, on sait laminer les tôles d'acier de sorte à avoir une orientation privilégiée des grains monocristallins qui forment la tôle. Les tôles de transformateur sont découpées de telle sorte que cette orientation, en général $<001>$, soit celle du champ **H** de la bobine du transformateur.

4.9 L'antiferromagnétisme

Dans un matériau antiferromagnétique, les moments magnétiques élémentaires présentent une interaction spontanée négative, c'est-à-dire, que deux moments voisins sont orientés en sens contraire. La courbe de la susceptibilité χ des antiferromagnétiques en fonction de la température (Fig. 4.9) possède un point singulier appelé *point Néel* (pour le MnO le point Néel est -151°C). L'alignement antiparallèle des antiferromagnétiques est généralement dû à la présence d'ions de nature différente, par exemple d'un oxygène entre deux ions de moment magnétique non nul. On trouve cette propriété dans certains oxydes tels que NiO, FeO, MnO ou d'autres composés tels que MnS.

4.10 Le ferrimagnétisme

C'est le magnétisme d'une classe d'oxydes métalliques ou de céramiques électriquement très résistifs appelés ferrites. La structure de ces matériaux, dont l'exemple le plus courant est celui de Fe_2O_3, est celle d'une spinelle. C'est essentiellement une structure où les ions oxygène forment un réseau cubique à faces centrées et où les ions fer sont en positions interstitielles. Dans cette structure il y a deux positions différentes pour les ions métalliques: Les ions Fe^{2+} occupent les sites octaédriques, alors que les ions Fe^{3+} ocupent aussi bien les sites tétraèdriques que les sites octaèdriques.

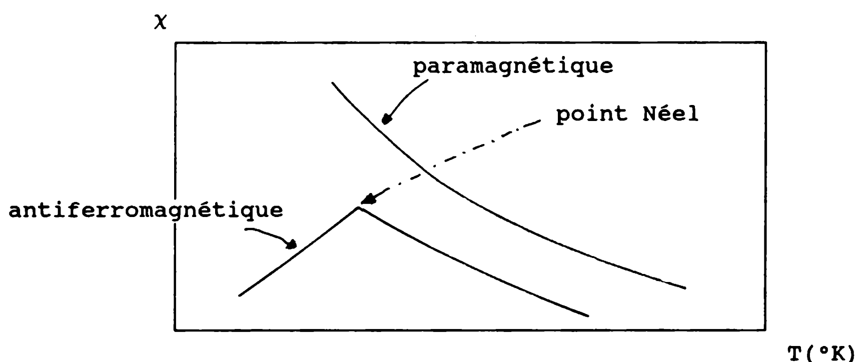


Fig. 4.9: Susceptibilité magnétique en fonction de la température pour un paramagnétique et un antiferromagnétique.

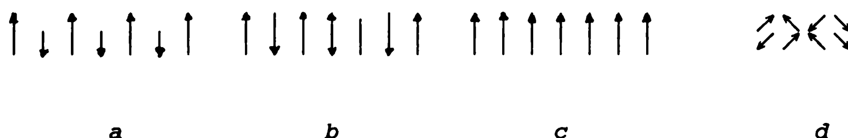


Fig. 4.10: Orientation des dipôles magnétiques élémentaires dans un domaine d'un matériau (*a*) ferrimagnétique, (*b*) antiferromagnétique, (*c*) ferromagnétique et (*d*) paramagnétique.

4.11 Les matériaux magnétiques doux

4.11.1 Introduction

Les matériaux ferromagnétiques se divisent en deux catégories dont les champs d'aplication sont différents:
1/ les matériaux magnétiques doux qui sont des matériaux possédant un faible champ coercitif (H_c inférieur à quelques centaines d'ampères par mètre). Ils sont généralement employés en électrotechnique sous des fréquences industrielles (tôles ferromagnétiques) et en électronique sous des fréquences supérieures à 50 kHz (ferrites).
2/ les matériaux magnétiques durs (H_c supérieur à quelques milliers d'ampères par mètre) qui servent à fabriquer des aimants permanents.

4.11.2 Le fer

Le fer ordinaire, tel qu'il sort des fours d'aciéries, est un bon matériau magnétique doux: grande induction de saturation $\mathbf{B}_s$, grande perméabilité μ, etc... Malheureusement il contient certaines impuretés (en particulier l'azote à quelques millièmes pour cent) qui forment à la longue des précipités de seconde phase qui dégradent ses propriétés magnétiques.
Les fers peuvent être traités pour avoir des caractéristiques intéressantes (H_c = 50 A/m, μ_{max} = 8000). On les utilise surtout en champ continu: circuit auxiliaire d'aimant, pôles d'aimant, relais magnétiques, blindages, moteurs.

4.11.3 Le fer silicié

Lorsqu'on ajoute du silicium au fer (jusqu'à 4,5%), la durée du traitement qui débarrasse le fer de ses impuretés est plus courte, sa perméabilité maximale augmente, ses pertes par hystérésis diminuent et sa résistivité électrique augmente. Cette dernière propriété

justifie le choix du fer silicié sous forme de lames minces isolées lorsqu'on veut éviter l'échauffement par courants de Foucault. Il est utilisé pour les machines tournantes et les transformateurs.

Le *procédé Goss*, mis au point en 1934, permet de laminer les tôles de fer silicié de sorte à orienter les grains de manière à avoir les directions d'aimantation facile parallèles au sens du laminage.

Pour obtenir une tôle à gains orientés, on effectue d'abord un laminage à froid des tôles au silicium, suivi par un recuit à 1000°C par passage de la bande dans un four continu. Ce recuit provoque une recristallisation suivant l'orientation montrée sur la figure 4.11. Dans la texture obtenue, appelée texture de Goss, les plans cristallographiques <110> sont parallèles au plan de la tôle et la direction <001> de facile aimantation est parallèle à la direction de laminage. Un nouveau laminage à froid amène le matériau à son épaisseur définitive et un recuit décarburant termine le cycle des opérations.

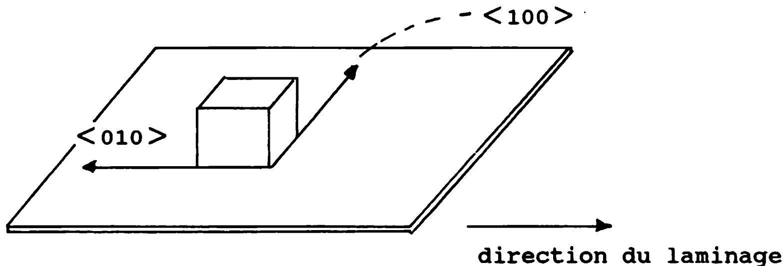


Fig. 4.11 Orientation de la maille de fer dans un micrograin monocristallin dans une bande de fer silicié à grains orientés laminée suivant le procédé Goss.

4.11.4 Alliages fer-nickel

Ce sont des alliages qui contiennent 28 à 78 % de fer. Dans ces compositions l'alliage cristallise dans le système cubique à faces centrées. On ajoute à l'alliage de petites quantités de cuivre, de chrome ou de molybdène pour obtenir certaines propriétés particulières.

Alliages à 30 % de nickel (Thermoflux): ils possèdent une température de Curie proche de l'ambiante (70°C). On les utilise pour compenser la dérive des appareils de mesure.

Alliages 36 % de nickel (Radiométal 36): ils possèdent une résistivité élevée et de faibles pertes. Ils sont utilisés en haute fréquence (jusqu'à 100 kHz) dans les transformateur de radar, les inductance téléphonique,...

Alliages à 48-50 % de nickel (Permax M, Anhyster D, Radiométal 50): ils possèdent une induction de saturation et une température de Curie élevées. Ils sont faciles à mettre en forme (tôle mince, profil U et E). On les utilise pour fabriquer des sécurités de chauffage à gaz, des écouteurs téléphoniques, des amplificateurs magnétiques, des mémoires, des relais statiques,...

Alliages à 75-80 % de nickel (Permalloys): ils possèdent une perméabilité élevée, un champ coercitif et une induction à saturation faibles, donc de faibles pertes hystérésis. Leur résistivité est faible, mais elle augmentée par l'addition de molybdène; on obtient le Mo permalloy (79 Ni, 17 Fe, 4 Mo) et le supermalloy (79 Ni, 16 Fe, 5 Mo). La perméabilité maximum de ce dernier alliage peut atteindre 10^6. Le molybdène peut être remplacé par le chrome ou le cuivre. Ces alliages sont utilisés pour fabriquer des transformateurs de mesure, des inductances d'antiparasitage, des têtes d'enregistrement, des transformateurs H.F., des transformateurs d'impulsion, des disjoncteurs différentiels, des filtres des blindages magnétiques, etc...

4.11.5 Alliages spéciaux

Les alliages fer-cobalts dont la proportion de cobalt est de 25 et 50 % possèdent une température de Curie élevée; leur aimantation à saturation est la plus élevée parmi les alliages ferromagnétiques (24600 gauss pour la composition Fe_2Co). Leur résistivité peut être augmentée sensiblement par addition de chrome ou de vanadium. Ils sont intéressants aussi bien sur le plan scientifique que sur le plan industriel. Ils sont utilisés dans les applications où l'on a besoin d'une grande densité de flux.

A 30 % de cobalt dans le fer, l'alliage peut être moulé et on en fabrique des pôles d'aimant.

A 50 % de cobalt (Permendur), l'alliage possède une perméabilité et une aimantation à saturation élevées. En ajoutant 2 % de vanadium, il devient ductile sans perdre ses qualités mécaniques. Ce dernier alliage est connu sous le nom de V permendur. Il présente les plus faibles poids et encombrement pour la plus grande aimantation à saturation, il est utilisé dans les générateurs à bord d'avions.

4.11.6 Les ferrites

Les ferrites sont des céramiques magnétiques dont la résistivité est de plusieurs ordres de grandeurs plus élevée que celle des alliages. Ce sont des matériaux deux fois plus légers que le fer. L'exemple le plus caractéristique de ces matériaux est la magnétite Fe_3O_4 dont la structure est celle d'une spinelle. Les autres ferrites sont des oxydes binaires dont la formule générale est MFe_2O_3 dans laquelle M représente un ou plusieurs métaux bivalents tels que Ni, Mn, Zn, Mg, Cu,...

Les principaux ferrites utilisés ont une structure spinelle; d'autres ont une structure hexagonale ($Ba_6Fe_2O_3$); ou une structure de grenat ($M_3Fe_5O_{12}$), M étant un métal trivalent.

Les ferrites au manganèse ($Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_3$) possèdent une perméabilité très élevée (500-1000) mais une basse résistivité ($\neq 1$ Ω.m). Ils sont utilisés dans les domaines où l'on ne dépasse pas quelques centaines de kHz.

Les ferrites au nickel ($Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_3$) possèdent une résistivité élevée, ce qui permet de les utiliser en haute fréquence sans grande perte.

Certains ferrites possèdent la particularité d'entrer en résonance avec la fréquence d'un champ magnétique extérieur par l'interaction de leur électron qui s'anime d'un mouvement de précession. Cette précession est ralentie par l'interaction de l'électron avec le réseau, l'énergie étant cédée au réseau sous forme de chaleur. C'est le cas des ferrites à structure de grenat qui possèdent une résonance étroite, en particulier le grenat d'yttrium et fer, nommé YIG ($Y_3Fe_5O_{12}$). La largeur du domaine de résonance dépend de plusieur facteurs: la composition, la dimension et l'orientation des grains, le champ appliqué, l'état de surface, la forme, etc...

4.11.7 Les matériaux comprimés

Ce sont des matériaux utilisés en haute fréquence (transformateurs, noyaux de bobine). Ils sont obtenus par la compression dans un milieu isolant sous des pressions allant jusqu'à 3 tonnes par cm^2 de fines particules de fer et de nickel (3 à 20 μm de diamètre). Une composition particulière (80 Ni, 18 Fe, 2Mo) est utilisée pour fabriquer des noyaux et des filtres pour les circuits de communication.

4.12 Les matériaux magnétiques durs

Les matériaux pour aimants permanents représentent une bonne part dans la production des matériaux magnétiques. Les aimants permanents sont utilisés dans les moteurs, les générateurs, les hauts-parleurs, les écouteurs téléphoniques, etc...

Un aimant idéal est formé de fines particules ferromagnétiques toutes orientés dans le même sens et emprisonnées dans une matrice non ferromagnétique. Chaque particule forme un domaine magnétique unique. L'énergie nécessaire pour faire tourner le sens des domaines est très élevée, et en tout cas supérieure à celle qui utilise le déplacement des parois de Bloch.

TABLEAU 4.3
Propriétés et composition de quelques matériaux ferromagnétiques doux.

Matériau	Composition(%) (le reste en fer)	Traitement thermique (°C)	μ (B=20G)	μ_{max}	B_s (G)	H_c (Oe)	ρ ($\mu\Omega$-cm)	W_h (erg /cm3)	densité (g/cm³)
Cobalt	99Co	A1000	75	300	18000	10	9		8.9
Nickel	99Ni	A1000	200	800	6000	3	8		8.9
Fonte	3-4.5C	C	100	650	15000	3-10	30		7
Acier laminé		A950	180	2000	21000	1.8	11		7.86
Fer		A950	200	5000	21500	1.0	10	5000	7.86
Fer purifié		1480,H480	5000	180000	21500	0.05	10	300	7.86
Fer à 4% Si	3.6Si	A800	600	7000	19700	0.5	60	3500	7.65
Fer silicié à grains orientés	3Si	A800	1500	30000	20000	0.15	47		7.67
45 permalloy	45Ni,0.3Mn	A1050	2500	25000	16000	0.2	50	1200	8.17
45 permalloy	45Ni,0.3Mn	HA1200	4000	50000	16000	0.07	50		8.17
Hipernik	50Ni	HA1200	4500	70000	16000	0.05	50	220	8.25
50%Fe,50%Ni à grains orientés	50Ni	HA1050,F		150000	16000	0.1	50		8.25
Monimax	48Ni,3Mo	HA1125	2000	35000	15000	0.1	80		8.27
Sinimax	46Ni,3Si	HA1125	3000	35000	11000		90		
78 permalloy	78.5Ni,0.3Mn	1050,Q600	8000	100000	10700	0.05	16	200	8.60
4-79 permalloy	79Ni,4Mo,0.3Mn	Q1100	20000	100000	8700	0.05	55	200	8.72
Mumétal	75Ni,2Cr,5Cu	H1175	20000	100000	6500	0.05	62		8.58
Supermalloy	79Ni,5Mo,0.3Mn	H1300,Q	100000	800000	8000	0.002	60	8.75	
Permendur	50Co,0.3Mn	A800	800	5000	24500	2.0	7	12000	8.3
2V permendur	49Co,2V	A800	800	4500	24000	2.0	26	6000	8.2
Hiperco	34Co,2Cr	A850	650	10000	24200	1.0	25		8.0
43-23 perminvar	43Ni,23Co	A1000,F		150000	15600	0.07	20		8.73
Alliage Heusler	61Cu,26Mn,13Al	Q800,B		250	5500				
Sendust	9Si,5Al	C	30000	120000	10000	0.05	80		7.33
2-81 permalloy	81Ni,2Mo	A650	125	130	8000	<1.0	10^6		7.8
Ferrite Mn-Zn	$MnFe_2O_2+ZnFe_2O_2$	A1100-1200	1000	1500	2500	0.1	10^8		5.0
Ferrite Ni-Zn	$NiFe_2O_2+ZnFe_2O_2$	A1100-1200	450	3500	3300	0.35	10^{14}		5.0

Traitement thermique: A, recuit; B, cuisson; F, traitement en présence de champ magnétique; H, hydrogène; Q, trempe ou refroidissement controlé.

Pour les matériaux à grains orientés, les propriétés sont prises parallèlement à la direction du laminage.

Hipersil, Silectron, Corosil sont des marques commerciales du fer silicié à grains orientés.

Deltamax, Orthonik, Hipernik V, Permanite, Orthonol sont des marques commerciales de l'alliage 50Fe-50Ni.

Nicolai, 4750 Alloy, Carpenter 49, Armco 48, Audioalloy sont des marques commerciales du 45 permalloy recuit sous hydrogène.

Ferroxcube, Ferramic, Ceramag sont des marques commerciales des ferrites.

Les matériaux 43-23 perminvar, alliage Heusler, Sendust ne sont commercialisés.

W_h: pertes hystérisis.

C'est en 1931 que Mishima a découvert que les alliages fer-nickel-aluminium peuvent être de bons matériaux magnétiques durs (B_r = 6000 G, H_c = 600 Oe, $(BH)_m$ = 1,4 10^6 G.Oe). Plus tard, on a ajouté du cobalt aux alliages Mishima et obtenu la série des alnicos.

Les alliages alnicos présentent à 1300°C une structure cubique à faces centrées stable. A 800°C cette structure se décompose en deux phases α et α'. La phase α' est riche en cobalt et en fer, donc fortement magnétique. La phase α, riche en nickel et en aluminium, forme la matrice. Les grains de la phase α' acquièrent, sous champ magnétique, une forme cylindrique de 300 A° de diamètre et de 1200 A° de hauteur; ils sont alignés dans

la direction <100> de α. Chaque grain est un domaine de Weiss.

On distingue l'alnico 2 (17Ni, 10Al, 12.5Co, 6Cu, 54.5Fe), l'alnico 5 (14Ni, 8Al, 24Co, 3Cu, 51Fe), l'alnico 6 (15Ni, 8Al, 24Co, 3Cu, 1.25Ti, 48.75Fe), l'alnico 7 (18Ni, 8.5Al, 24Co, 3.2Cu, 5Ti, 41.3Fe) et l'alnico 8 (14.5Ni, 7Al, 35Co, 5Cu, 5Ti, 33.5Fe).

A côté des alnicos dont on montre les courbes de désaimantation sur la figure 4.12, il existe d'autres composés qui servent à fabriquer des aimants permanents. On peut citer: les poudres de fer et de fer-cobalt, qui sont obtenues par électrolyse des sels de fer ou de fer et de cobalt: on fait déposer de fines particules sur une électrode de mercure; on ajoute du plomb qui sert de matrice; le reste de mercure est distillé sous vide; enfin les particules sont pressées sous champ magnétique. Les aimants ainsi obtenus peuvent avoir des formes géométriques compliquées; on les utilise dans les moteurs et les appareils de mesure.

Les alliages de fer-cobalt-molybdène, tels que le remalloy ou le comol (17 à 20 % Mo, 12 % Co, le reste Fe), sont obtenus par trempe à l'huile à 1200-1300°C, suivi d'un recuit pendant une heure à 675°C. Ils ont l'avantage de pouvoir être forgés.

Les aciers trempés étaient très utilisés avant 1932, c'est-à-dire avant la découverte des alnicos et des remalloys. Ils sont obtenus par trempe à 940°C, où ils cristallisent dans une structure martensite, suivie d'un recuit à 100°C.

4.13 Les aimants permanents ductiles

Les alliages fer-nickel-cuivre. Ce sont des alliages connus sous la dénomination cunife I (20 Ni, 20 Fe, 60 Cu) et cunife II (50 Cu, 20 Ni, 2.5 Co, 27.5 Fe). Ils peuvent être étirés ou tréfilés à froid. Ils sont utilisés pour confectionner des fils et des feuilles magnétiques.

Les alliages nickel-cobalt-cuivre. Ces alliages sont homogénéisés à 1150 °C pendant 15 heures, et recuits à 700 °C pour développer leurs propriétés d'aimants permanents. Ils ont l'inconvénient de ne pouvoir être travaillés à chaud. On en fabrique des feuilles. L'alliage contenant 29 Co, 21 Ni et 50 Cu s'appelle cunico I.

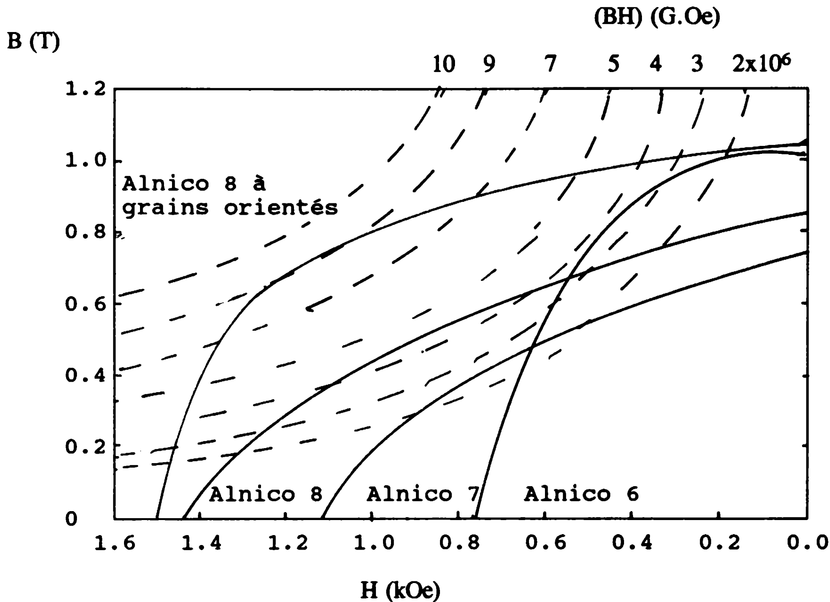


Fig. 4.12: courbes de désaimantation des alliages alnico.

L'alliage cobalt-platine. C'est un alliage très cher. Il est formé de fines particules qui possèdent une anisotropie cristalline très élevée, ce qui leur donne le produit $(BH)_m$ le plus élevé (9.10^6 G.Oe) parmi les aimants permanents ductiles. C'est un alliage qui peut être travaillé aussi bien à chaud qu'à froid.

L'alliage cobalt-samarium. Il coûte moins cher que l'alliage Co-Pt. On le fabrique à partir du composé Co_5Sm qui est réduit en poudre. La poudre est ensuite frittée sous champ magnétique. Chaque grain est un domaine de Weiss. Les aimants en alliage cobalt-samarium qui développent une induction rémanente B_r de 0.9 T sont utilisés pour fabriquer des aimants de très petites dimensions (robotique, moteurs d'entrainement d'imprimerie et de lecteur de disquettes, servo-moteurs, moteurs pas à pas, horlogerie...) La composition

$Co_{17}Sm_2$ peut développer une induction rémanente de 1,07 T.

Les alliages fer-cobalt-vanadium. Ces alliages, découvert en 1936, couvrent une plage de composition de 30-52 % Fe, 36-62 % Co et 4-16 % V. On les appelle vicalloys. Ils sont utilisés pour obtenir de grandes billes coulées et peuvent être laminés pour donner des feuilles minces. La courbe 4.13 donne des courbes de désaimantation de trois alliages vicalloys.

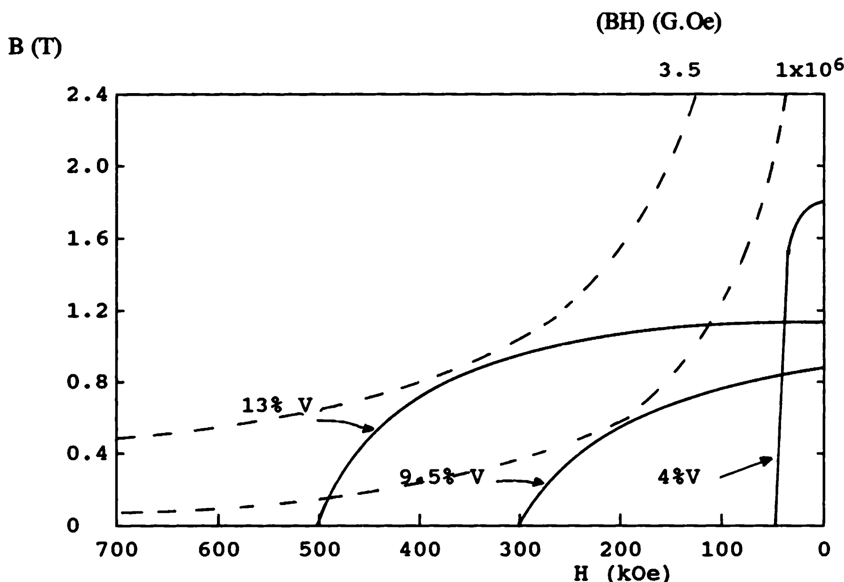


Fig. 4.13: coubes de désaimantation de 3 alliages vicalloys

Les alliages Néodyme-Fer-Bore. Les aimants faits de ces alliages possèdent une aimantation rémanente très élevée, donc une énergie importante à température ambiante. Mais le fer et le néodyme sont des matériaux très oxydables; ils doivent être protégés par une couche étanche organique ou métallique. De plus, leur utilisation à grande échelle est limitée par des problèmes non résolus de stabilité au-delà de 100°C. Cependant, à cause de leur prix au kilogramme beaucoup plus bas que celui du cobalt-samarium, les firmes mènent des

recherches pour en améliorer la tenue à la température et à l'oxydation. Leur facilité de mise en oeuvre sous forme de polymères magnétiques, alliée à leurs caractéristiques, devrait leur assurer un avenir important.

4.14 Les fluides magnétiques

Un fluide magnétique est une solution colloïdale où de minuscules particules ferromagnétiques sont en suspension dans un liquide porteur. Le diamètre des particules est de 100 A° et chacune d'entre elles est un domaine magnétique. On les enrobe d'une couche monomoléculaire d'une substance appelée *surfactant* pour éviter qu'elles se collent entre elles. (Ex: l'acide oléique permet de stabiliser une suspension de particules de magnétite dans du kérosène.)

Les ferrofluides sont utilisés:

- pour former des joints inusables et étanches à l'air dans certains dispositifs tounants.
- dans les dispositifs d'absorbtion des oscillations indésirables des machines-outils à commande numérique, ou les tables traçantes...
- comme réfrigérant pour la bobine mobile des haut-parleurs.

TABLEAU 4.4
Propriétés et composition de quelques matériaux ferromagnétiques durs.

Matériau	Composition(%) (le reste Fe)	Traitement thermique (°C)	H_{MAX} (Oe)	H_c (Oe)	Br (G)	$(BH)_{MAX}$ $\times 10^{-6}$	Méthode de fabr.	Prop. méca.	densité (g/cm³)
Acier au carbone	1Mn,0.9C	Q800	300	50	10000	0.20	HR,M,P	H,S	7.76
Acier au tungstène	5W,0.3Mn,0.7C	Q850	300	70	10300	0.32	HR,M,P	H,S	8.1
Acier au chrome	3.5Cr,0.9C,0.3Mn	Q830	300	65	9700	0.30	HR,M,P	H,S	7.76
Acier à 17% de Co	17Co,.75C,.25Cr,8W		1000	150	9500	0.65	HR,M,P	H,S	
Acier à 36% de Co	36Co,.7C,4Cr,5W	Q950	1000	240	9500	0.97	HR,M,P	H,S	8.2
Remalloy ou Comol	17Mo, 12Co	Q1200, B700	1000	250	10500	1.1	HR,M,P	H	8.4
Indalloy	Mo,Co (fritté)		1000	240	9000	0.9	Pr,Sn	H	8.05
Alnico I	12Al,20Ni,5Co	A1200, B700	2000	440	7200	1.4	C,G	H,B	6.9
Alnico II	10Al,17Ni,2.5Co,6Cu	A1200,B600	2000	550	7200	1.6	C,G	H,B	7.1
Alnico II	fritté	A1300	2000	520	6900	1.4	Pr,Sn,G	H	6.9
Alnico III	12Al,25Ni	Q1300,B600	2000	450	6500	1.3	C,G	H,B	6.9
Alnico IV	12Al,28Ni,5Co	Q1200,B650	3000	700	5500	1.3	Sn,C,G	H	7.0
Alnico V	8Al,14Ni,24Co,3Cu	AF1300,B600	2000	550	12500	4.5	C,G	H,B	7.3
Alnico VI	8Al,15Ni,24Co,3Cu,1Ti	AF	3000	750	10000	3.5	C,G	H,B	7.4
Alnico VII	8.5Al,18Ni,24Co,3.25Cu,5Ti	AF	3000	1050	7200	2.9	C,G	H,B	7.2
Alnico VIII	7Al,14.5Ni,35Co,5Cu,5Ti	AF	3500	1450	8500	4.5	C,G	H,B	
Alnico VIII	à grains orientés	AF	3500	1490	10600	6.5	C,G	H,B	
Alnico XII	6Al,18Ni,35Co,8Ti		3000	950	5800	1.5	C,G	H,B	7.2
Vicalloy I	52Co,10V	B600	1000	300	8800	1.0	C,CR,M,P	D	8.2
Vicalloy II (fil)	52Co,14V	CW + B600	2000	510	10000	3.5	C,CR,M,P	D	8.1
Cunife (fil)	60Cu,20Ni	CW + B600	2000	550	5400	1.5	C,CR,M,P	D,M	8.6
Cunico	50Cu,21Ni,29Co		3000	660	3400	0.80	C,CR,M,P	D,M	8.3
Vectolite	$30Fe_2O_3$,$44Fe_2O_4$,$26Co_2O_3$		3000	1000	1600	0.60	Pr,Sn,G	W	3.1
Silmanal	86.8Ag,8.8Mn,4.4Al		20000	6000	550	0.075	C,CR,M,P	D,M	9.0
Pt-Co	77.5Pt,22.5Co	A1000,B600	10000	4100	6500	9.0	C,CR,M	D	
Fer	poudre fine	aucun	2000	425	6400	1.1	Pr	W	

Traitement thermique: Q, trempe à l'huile ou à l'eau; A, refroidi à l'air; B, cuit; F, refroidi dans un champ magnétique; CW, travaillé à froid.
Methode de fabrication: HR, laminé à chaud ou forgé; CR, laminé à froid; M, usiné; G, doit être meulé; P, poinçonné; Pr, pressé; C, coulé; Sn, fritté.
Propriétés mécaniques: H, dur; B, cassant; S, résistant (méc.); D, ductile; M, malléable; W, faible (méc.).

EXERCICES

4.1 La terre possède un moment dipolaire magnétique $\mu = 6.4 \times 10^{21}$ A.m^2.
a) Quel est le courant qui doit parcourir une spire unique entourant la terre par l'équateur pour produire un tel moment?
b) Sachant que la terre effectue un tour en 24 heures et que son rayon est de 6400 km, quelle doit-être la valeur d'une charge électrique superficielle σ uniformément répartie sur la surface de la terre, qui produirait le même moment?

4.2 Soit une barre de fer de 5 cm de longueur et de 1 cm^2 de section. Le moment dipolaire magnétique d'un atome de fer est de $1.8\ 10^{-23}$ A.m. On supose que tous les dipôles de la barre sont alignés.
a) Quel est le moment dipolaire magnétique de la barre?
b) Quel est le couple de forces qui agit sur cette barre si elle est plongée dans un champ extérieur de 1500 G ?

4.3 Citez les cinq éléments ferromagnétiques et dites à quoi est dû leur ferromagnétisme.

4.4 Quel est le comportement d'un cube de substance paramagnétique en présence d'un aimant?

4.5 Comment appelle-t-on les domaines ferromagnétiques où les dipôles sont tous orientés dans le même sens?

4.6 A chaque substance ferromagnétique est associée une température T_C. Comment s'appelle cette température? Que devient le corps ferromagnétique au-dessus de T_C?

4.7 Donner les trois cas où les parois de Bloch trouvent des difficultés pour se déplacer? Expliquer.

4.8 Qu'est-ce que le fer silicié à grains orientés? A quoi l'utilise-t-on?

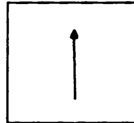
4.9 Soit un électron qui tourne autour de son noyau suivant une trajectoire circulaire de rayon r avec une vitesse angulaire ω_0. On lui applique un champ d'induction magnétique **B** qui fait un angle α avec ω_0.
1°) Calculer le moment dipolaire magnétique orbital **p** en fonction de r, ω et de la charge q de l'électron.
2°) Calculer la force magnétique F qui tend à faire tourner ω pour le coucher parallèlement à **B**.
Dans toute la suite, on suppose ω_0 parallèle à **B**.
3°) Calculer la force magnétique F qui agit sur l'électron.
4°) Calculer la variation de la vitesse angulaire $\Delta\omega$ qui résulte de l'application de B, en supposant que $\Delta\omega << \omega_0$.
5°) Calculer la variation du moment dipolaire Δp et indiquer son sens. Cette variation Δp explique un phénomène magnétique. Lequel ?

4.10 L'aimant permanent de la figure ci-dessous est un dipôle magnétique.
1°) En quoi le schéma, un dipôle magnétique d'un dipôle électrique sont-ils différents et en quoi sont-ils semblables?
2°) En électrostatique, les trois vecteurs **P**, **E** et **D** sont liés par la relation:

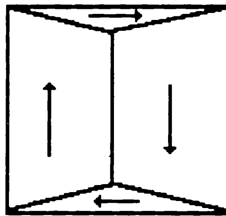
$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

Quelle est la relation semblable qui lie les trois vecteurs fondamentaux du magnétisme? Quel est le nom de ces trois vecteurs? En quelle unités s'expriment-ils?
3°) L'aimant de la figure est formé d'un seul domaine de Weiss.
a/ Comment se divise-t-il en plusieurs domaines magnétiques pour minimiser l'énergie magnétostatique W_{ms}? Faire un schéma.
b/ Quel est l'avantage de votre schéma par rapport à la figure du problème?
4°) Sur votre schéma figurent des domaines triangulaires, comment s'appellent-t-ils? Indiquer par des flèches sur le schéma le sens des dipôles dans chaque domaine.

5°) L'énergie magnétostrictive W_{mt} qui est proportionnelle aux domaines triangulaires, est minimisée si ces do,aines sont minimisés. Expliquer pourquoi cette minimisation ne va pas jusqu'à l'annulation des domaines.



4.11 Soit un échantillon ferromagnétique dont les moments des dipôles magnétiques sont orientés comme le montre le schéma suivant:



On applique à l'échantillon un champ **H** orienté de gauche à droite.

a/ Dessiner la courbe B-H de sa première aimantation et de sa désaimantation.

b/ Définir B_s, B_r, H_c et $(BH)_{max}$, et porter ces points sur la courbe.

c/ Faire deux schémas intermédiaires de l'échantillon lors de la première aimantation et un schéma à saturation.

4.12 Un solide paramagnétique de forme allongée, soumis à un champ magnétique extérieur, tourne pour se mettre dans le sens des lignes du champ sans tenir compte du sens. Expliquez pourquoi. (Illustrez votre propos par un schéma).

5

Les semi-conducteurs

5.1 Introduction

L'atome est composé de protons, de neutrons et d'électrons. Chaque proton possède un quantum (quantité indivisible) de charge positive et chaque électron un quantum de charge négative; le neutron est neutre. Les protons et les neutrons forment le noyau de l'atome, les électrons gravitent autour du noyau.

Les atomes sont classés par le nombre de protons que contient leur noyau. Ce classement constitue la table périodique des éléments, appelée aussi tableau de Mendeléev.

Un atome est neutre électriquement quand le nombre de ses électrons est égal au nombre de ses protons; si les deux nombres sont différents, on l'appelle un ion. Les électrons d'un atome occupent différentes couches autour du noyau, la capacité de ces couches est limitée. Les couches les plus proches du noyau sont remplies complètement et seule la couche extérieure participe aux liaisons chimiques entre les atomes.

Mendéléev avait remarqué que les atomes dont la couche extérieure contient huit électrons (les gaz rares) sont les plus stables chimiquement.

Dans les liaisons chimiques, les atomes tendent à avoir leur couche électronique extérieure complète. Prenons par exemple un atome de la colonne VII du tableau de Mendéléev et un atome de la colonne I; dans la liaison chimique qui les unit, l'atome de la colonne I donne l'électron de sa couche extérieure à l'atome de la colonne VII; il a ainsi zéro électron dans sa couche extérieure tandis que l'atome de la colonne VII en a huit; cette liaison chimique est dite ionique. La même chose est obtenue quand un atome de la colonne II réagit avec un atome de la colonne VI.

Les atomes de la colonne IV ont 4 électrons dans leur couche extérieure; quand ils forment un corps solide en s'alliant chimiquement entre eux, ils ne peuvent que mettre leurs électrons en commun, chacun d'entre eux peut qlors avoir 8 électrons sur sa couche extérieure pendant une partie du temps et zéro pendant l'autre (Fig. 5.1). Cette liaison chimique est appelée liaison covalente. C'est le cas de la liaison Si-Si. Les solides à liaison covalente sont en général des semi-conducteurs.

Dans un cristal de silicium, chaque atome occupe le centre d'un tétraèdre et sur chaque sommet du tétraèdre se trouve un autre atome. Cette disposition des atomes donne le réseau cristallin du silicium (Fig. 5.2), où chaque atome partage deux électrons avec son voisin (le sien et celui de son voisin.)

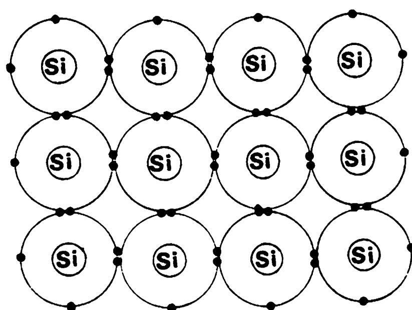


Fig. 5.1: Disposition schématique des atomes de silicium dans un espace à deux dimensions, chaque atome partage 8 électrons avec ses quatre voisins.

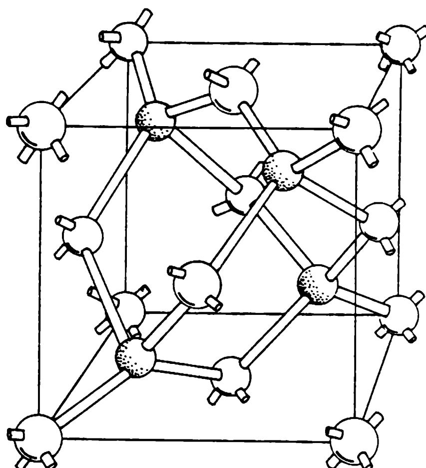


Fig. 5.2: Réseau cristallin du silicium (cubique à faces centrées).

5.2 Conducteurs, isolants et semi-conducteurs

Quand on applique un champ électrique E aux bornes d'un solide, la densité de courant J qui le traverse est proportionnelle à E:

$$J = \sigma E. \tag{5.1}$$

La constante de proportionnalité σ est appelée *conductivité*. σ est de l'ordre de 10^6 pour les conducteurs, de 10^{-6} pour les isolants, et de 1 pour les semi-conducteurs. Nous allons voir plus loin que, par des traitements particuliers des semi-conducteurs, on peut faire varier cette conductivité de plusieurs ordres de grandeurs.

5.3 La bande interdite

Pour mieux expliquer les propriétés électriques des solides, on peut considérer l'énergie de leurs électrons.

C'est grâce à la théorie quantique que l'on détermine l'énergie des électrons dans les solides. A chaque électron on associe une fonction d'onde ψ; les états d'énergie de l'électron sont les solutions de l'équation de Schrödinger:

$$H\psi = E\psi, \qquad (5.2)$$

où E est l'énergie et H le hamiltonien qui comprend habituellement la somme d'une partie cinétique $\hbar^2\nabla^2/2m$ et une partie potentielle V(r). La résolution de l'équation (5.2) pour un atome isolé montre que les électrons occupent des états énergétiques discrets bien définis où les électrons des couches intérieures occupent les états de basse énergie. Quand les atomes s'allient entre eux, la théorie quantique montre que ces états énergétiques discrets dégénèrent et deviennent des bandes contenant plusieurs états énergétiques très voisins; ces bandes sont séparées par des régions où il n'y a pas d'état d'énergie possible (Fig. 5.3).

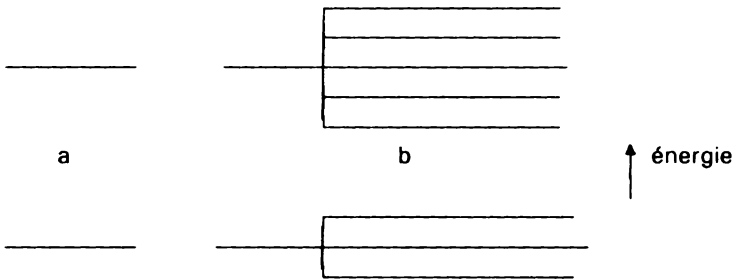


Figure 5.3: Niveaux d'énergie permis pour les électrons dans un atome isolé (a) et bandes permises dans un solide (b)

Sur la figure 5.4 on a représenté schématiquement les bandes les plus énergétiques de trois solides, l'ordonnée représentant l'énergie et l'abscisse la distance. Les bandes de basse énergie (non représentées sur la figure) sont remplies par les électrons des couches intérieures. L'occupation de la dernière bande (la plus énergétique) dépend de la nature du solide considéré (conducteur, isolant ou semi-conducteur) et de l'apport d'énergie extérieure (température, éclairement).

o électron
● trou

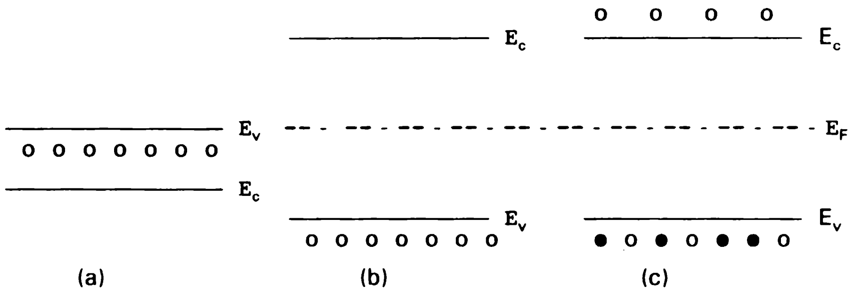


Figure 5.4: (a): bandes de conduction et de valence d'un métal à 0°K. (b): bandes d'un semi-conducteur à 0°K et à l'obscurité (ou d'un isolant à n'importe quelle température). (c): bandes d'un semi-conducteur à T ≠ 0°K.

Pour un conducteur la dernière bande, nommée *bande de conduction*, n'est pas complètement remplie, c'est-à-dire que les états d'énergie de la bande ne sont pas tous occupés. Un électron d'un état énergétique donné peut occuper un état voisin vide, à peine plus énergétique, en particulier si un champ électrique extérieur lui fournit l'énergie nécessaire. Les électrons de la bande de conduction d'un conducteur se déplacent facilement sous l'effet d'un champ électrique extérieur puisqu'ils disposent d'états non occupés dans la même bande.

Pour un isolant la dernière bande, nommée *bande de valence*, est complètement remplie; tous ses états énergétiques sont occupés, chacun par électron. Les électrons ne peuvent pas s'y déplacer sous l'effet d'un champ électrique, puisque le principe d'exclusion de Pauli interdit l'occupation d'un état par plus d'un électron. La première bande vide qu'on rencontre en se déplaçant dans le sens des énergies croissantes est la bande de conduction. L'espace énergétique qui la sépare de la bande de valence ne contient pas d'états d'énergie permis et s'appelle la *bande interdite* ou le *gap* et il a pour largeur E_g. La largeur de la bande interdite d'un isolant est importante ($E_g > 4$ eV).

Dans un semi-conducteur, la largeur de la bande interdite des E_g est faible ($E_g < 3$ eV). Au zéro absolu (0°K) et dans l'obscurité, la dernière bande énergétique

qui contient des électrons est la bande de valence, elle est entièrement pleine dans ce cas. A une température non nulle, grâce à l'énergie thermique quelques électrons de cette bande peuvent "sauter" dans la bande de conduction, puisque pour effectuer ce saut il faut vaincre l'énergie E_g qui est relativement faible. Les électrons qui se trouvent ainsi dans la bande de conduction donnent au semi-conducteur la propriété de conduire le courant électrique.

5.4 Paire électron-trou

Quand, dans un semi-conducteur, un électron de la bande de valence acquiert une énergie au moins égale à E_g, il passe dans la bande de conduction; il peut alors se mouvoir, en particulier si un champ électrique lui est appliqué, puisque la plupart des états énergétiques de la bande de conduction sont vides comme dans un conducteur. La place libérée par ce même électron dans la bande de valence crée un état énergétique vide qui peut être comblée par un électron de la même bande; ces états vides créés par le saut des électrons de la bande de valence donnent à cette derniére les caractéristiques de la bande de conduction, c'est-à-dire des états énergétiques non occupés qui permettent le mouvement des électrons. L'électron de la bande de valence qui comble la place vacante laissée par son voisin, libère sa propre place qui peut être occupée à son tour par l'électron voisin, et comme une bulle d'air dans un liquide, la place vacante se déplace dans le sens contraire du déplacement des électrons. Pour étudier la conduction électrique due aux électrons de la bande de valence, il est plus aisé de considérer que la place vide de la bandê de valence - appelée *trou* - est une particule dont la charge électrique est égale et de signe opposé à celle de l'électron.

Le "saut" d'un électron de la bande de valence dans la bande de conduction s'appelle *génération d'une paire électron-trou*; quand cet électron "retombe" dans un trou de la bande de valence, on dit qu'il y a *recombinaison*.

5.5 Niveau de Fermi

Dans un solide, le niveau de Fermi est le niveau énergétique le plus élevé qu'un électron puisse occuper à 0°K. A la température T, les électrons peuvent occuper des niveaux d'énergie supérieurs au niveau de Fermi et la probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie E par un électron est donnée par la fonction de Fermi:

$$f(E) = \frac{1}{\exp((E-E_f)/kT)+1}, \qquad (5.3)$$

où k est la constante de Boltzmann et E_f l'énergie de Fermi qui est, par définition, l'énergie dont la probabilité d'occupation est égale à 1/2.

Dans la représentation schématique de la figure 5.5, le niveau de Fermi peut être considéré comme un niveau de remplissage du solide par les électrons. C'est ainsi qu'à l'équilibre thermodynamique, ce niveau est constant à travers un solide donné, et il est continu à la jonction entre deux solides.

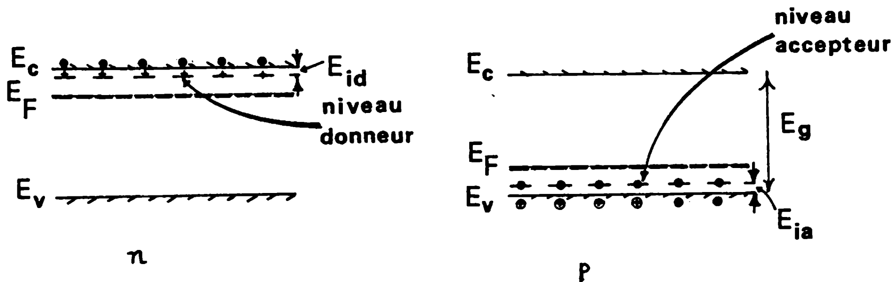


Fig 5.5: Représentation schématique des bandes d'un semi-conducteur dopé. Les impuretés donatrices et acceptrices donnent naissance à des niveaux dans la bande interdite.

5.6 Semi-conducteur intrinsèque et semi-conducteur dopé

Un semi-conducteur est dit *intrinsèque* quand le niveau de Fermi est exactement au milieu de la bande interdite.

C'est généralement le cas quand le semi-conducteur est pur.

Si, dans un cristal de silicium, on remplace un atome de silicium par un atome de phosphore - le phosphore a cinq électrons sur sa couche extérieure - ce dernier partage quatre de ses électrons périphériques avec quatre atomes voisins, le cinquième électron, qui n'a pas de niveau à occuper dans la bande de valence, se place dans la bande de conduction. Le phosphore, qui donne un électron au solide, s'appelle un atome *donneur*. Si l'on remplace plusieurs atomes de silicium (un atome sur un millions par exemple) par des atomes de phosphore on obtient autant d'électrons dans la bande de conduction, c'est-à-dire que si la concentration des atomes de phosphore est N_D par cm^3 on dispose alors de N_D électrons dans la bande de conduction. Le silicium est alors *dopé* au phosphore et il est de type *n* (comme négatif). La lettre *n* indique que la conduction électrique se fait par les électrons de la bande de conduction. Un tel dopage par des atomes donneurs provoque la montée du niveau de Fermi qui se rapproche de la bande de conduction, indiquant ainsi qu'il y a plus d'électrons dans le silicium de type *n* que dans le silicium intrinsèque. Si l'on dope le silicium avec un élément de la colonne IV (le bore par exemple), qui n'a que trois électrons sur sa couche extérieure, cet élément met en commun ses trois électrons périphériques et il partage ainsi 7 électrons avec ses quatre voisins. L'absence de huitième électron est un trou dans la bande de valence. Le silicium ainsi dopé est dit de *type p* (comme positif). Si N_A est la concentration d'atomes *accepteurs* (par exemple les atomes de bore), N_A est aussi la concentration des trous dans la bande de valence. Dans le silicium de type *p*, le niveau de Fermi se rapproche de la bande de valence, indiquant qu'il y a moins d'électrons dans le silicium de type *p* que dans le silicium intrinsèque; la conduction électrique se fait dans ce cas par le déplacement des trous de la bande de valence.

5.7 Concentration intrinsèque des porteurs

En chaque point d'un semi-conducteur, la concentration (par cm³) des électrons dans la bande de conduction est définie par la lettre *n* et celle des trous dans la bande de valence par la lettre *p*.

Ces concentrations dépendent du dopage, de la température et de l'éclairement. Toutefois, en appliquant les lois de la mécanique statistique et le principe d'exclusion de Pauli, on trouve que le produit *np* est constant pour un semi-conducteur donné à l'équilibre et à une température donnée. Ce produit est égal au carré d'une grandeur n_i, dite *concentration intrinsèque*, définie par l'expression:

$$n_i^2 = np = (2kT/h^2)^2(m_e m_h)^{3/2}\exp(-E_g/kT) \qquad (5.4)$$

où T est la température, k la constante de Boltzmann, m_e et m_h les masses effectives respectives des électrons et des trous et E_g la bande interdite.

Pour le silicium à la température ambiante, $n_i = 1{,}4.10^{10}$ cm^{-3} et $n_i^2 = 2.10^{20}$ cm^{-6}.

On peut considérer, sans s'écarter de la réalité, que tous les atomes donneurs sont ionisés et que la concentration des électrons dans un semi-conducteur de type *n* est égale à la concentration donneurs:

$$n = N_D.$$

Cette approximation permet de calculer la concentration *p* des trous de la bande de valence dans le silicium de type *n* en utilisant l'équation 5.4:

$$p_{no}N_D = n_i^2. \qquad (5.5)$$

De même, à l'équilibre, la concentration des électrons de la bande de conduction dans le silicium de type *p* est donnée par:

$$n_{po} = n_i^2/N_A. \qquad (5.6)$$

Dans un semi-conducteur dopé avec des impuretés donatrices et en même temps avec des impuretés acceptrices les électrons des atomes donneurs comblent les trous des atomes accepteurs et la concentration des porteurs majoritaires est égale à la différence entre les deux concentrations. La concentration des porteurs minoritaires est donnée par la relation 5.4.

5.8 Durée de vie et recombinaison

Quand une paire électron-trou est créée dans le silicium, l'électron (si le silicium est de type p), ou le trou (si le silicium est de type n), se trouve dans un état excité et il a tendance à retourner dans sa bande d'énergie d'origine à la moindre perturbation. L'énergie qu'il avait dans l'état excité est alors cédée au réseau cristallin sous forme de vibration.

Prenons par exemple un silicium de type *p* et créons N paires électrons-trous, le nombre des électrons se trouvant dans la bande de conduction est très inférieur au nombre de trous se trouvant dans la bande de valence. Dans le semi-conducteur de type *p*, les électrons sont appelés *porteurs minoritaires* de charge électrique. Les électrons de la bande de conduction tendent à retomber dans la bande de valence. Au bout d'un temps *t* le nombre de paires électrons-trous (qui est égal au nombre d'électrons dans notre exemple) diminue à cause de la recombinaison en suivant une décroissance exponentielle. Le nombre de paires non recombinées est égal à:

$$N = N_0 \exp(-t/\tau_n), \qquad (5.7)$$

où τ_n est un temps de relaxation appelé *durée de vie* des électrons dans le silicium de type *p*. On définit de la même manière la durée de vie des trous dans le silicium de type *n*.

Le fait que la durée de vie des porteurs minoritaires est limitée est dû à l'existence de centres de recombinaison. Un centre de recombinaison est un défaut dans la reproductibilité du cristal à partir de la maille élémentaire. Ce peut être une impureté (un atome étranger), un défaut cristallin (joint de grain, etc...), un

atome de silicium absent de son site cristallin ou en position intersticielle, etc...

Un centre de recombinaison introduit un niveau énergétique dans la bande interdite. Un électron qui passe près du centre de recombinaison tombe sur ce niveau comme dans un piège, et il réintègre ensuite la bande de valence.

Il existe un autre paramètre de recombinaison, qui intéresse particulièrement les photopiles solaires; c'est la recombinaison superficielle. La surface d'un cristal est une discontinuité drastique pour les porteurs de charge. Les liaisons pendantes des atomes en surface ainsi que les impuretés (saletés) qui se déposent lors de la manipulation du cristal, représentent autant de centres de recombinaison. On définit un courant de recombinaison superficielle J_{sur} tel que:

$$J_{sur} = q(n_p - n_{po})S \qquad (5.8)$$

où q est la charge de l'électron, $(n_p - n_{po})$ la concentration d'électrons en excès par rapport à l'équilibre dans un matériau de type *p*, et S la probabilité de recombinaison par unité de temps. Bien que S soit une probabilité de recombinaison, elle a les dimensions d'une vitesse; on l'appelle *vitesse de recombinaison superficielle*.

5.9 Courant électrique dans un semi-conducteur

Le déplacement des porteurs de charge dans un semi-conducteur homogène peut avoir deux origines: *l'entrainement*, dû à la présence d'un champ électrique E, et la *diffusion*, due à la présence d'un gradient de concentration des porteurs.

En présence d'un champ électrique E, il se crée un courant dont la densité est donnée par la loi d'ohm (éq. 1.1):

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \qquad (5.1)$$

Ce courant a le même sens que **E** puisque les trous, ayant une charge positive, se déplacent dans le même sens que **E** et les électrons, ayant une charge négative, se déplacent dans le sens contraire, avec les vitesses respectives:

$$v_p = \mu_p E \quad \text{et} \quad v_n = -\mu_n E, \tag{2.9}$$

où μ_p et μ_n sont les mobilités respectives des trous et des électrons, qui sont d'autant plus importantes que le semi-conducteur est pauvre en centres de recombinaison.

La densité de courant est proportionnelle au nombre de charges et à leur vitesse de déplacement, ce qui donne pour les électrons dans un semi-conducteur de type *p* la densité de courant:

$$J_n = q n_p v_n. \tag{5.10}$$

Des deux équations précédentes on tire la densité de courant et la conductivité des électrons:

$$J_n = q n_p \mu_n E \quad \text{et} \quad \sigma_n = q n_p \mu_n. \tag{5.11}$$

Pour les trous, la densité de courant et la conductivité sont:

$$J_p = q p_n \mu_p E \quad \text{et} \quad \sigma_p = q p_n \mu_p. \tag{5.12}$$

En cas d'inhomogénéité de concentration des porteurs, ceux-ci se déplacent vers les régions à basse concentration. Le courant produit par ce déplacement s'appelle *courant de diffusion*. La densité de courant de diffusion des électrons est proportionnelle au gradient de concentration de ceux-ci:

$$J_n = q D_n \nabla n_p(x,y,z), \tag{5.13}$$

où $n(x,y,z)$ est la concentration des électrons en fonction des trois coordonnées spaciales, et D la constante de

diffusion des électrons; cette dernière est liée à la mobilité par la relation d'Einstein:

$$D_n = (kT/q)\mu_n. \qquad (5.14)$$

La densité de courant des trous est:

$$J_p = -qD_p\nabla p_n(x,y,z). \qquad (5.15)$$

De toutes ces équations on peut tirer l'expression de la densité totale de courant dans un semi-conducteur:

$$J = J_n + J_p$$

où

$$J_n = q\mu_n n_p E + qD_n\nabla n_p \qquad (5.16)$$

et

$$J_p = q\mu_p p_n E + qD_p\nabla p_n \qquad (5.17)$$

5.10 La jonction p-n

Si l'on dope une partie d'un cristal de silicium au phosphore et l'autre partie au bore, le plan séparant les deux parties de type de conductivité différent s'appelle une jonction p-n.

La présence face à face des électrons en grand nombre dans la bande de conduction de la partie *n*, et des trous en grand nombre dans la bande de valence de la partie *p*, fait qu'aux abords de la jonction, les électrons de la partie *n* vont combler les trous de la partie *p* (il revient au même de dire que les trous de la partie *p* vont engloutir les électrons de la partie *n*). Quand un électron quitte la partie *n* pour passer du côté *p*, il laisse l'atome de phosphore privé de son cinquième électron et cet atome devient ionisé positivement; quand ce même

électron comble un trou dû à la présence du bore dans la partie *p*, l'atome de bore devient ionisé négativement. A partir d'une certaine concentration d'ions P^+ dans la partie *n*, et d'ions B^- dans la partie *p*, l'exode des électrons vers la partie *p* (ou des trous vers la partie *n*) n'est plus possible. En effet les charges spaciales P^+ d'un côté et B^- de l'autre, donnent naissance à un champ électrostatique dirigé de + vers - comme dans un condensateur plan. La région où les ions sont présents s'appelle la *région de charge d'espace*.

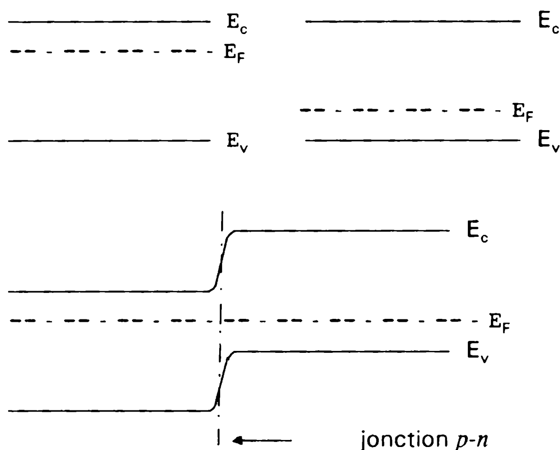


Fig. 5.6: Représentation des bandes dans une jonction *p-n*.

La représentation des bandes énergétiques éclaire la situation. La figure 5.6 représente les niveaux énergétiques du silicium. Le niveau E_c représente l'énergie de bas de la bande de conduction, le niveau E_v le haut de la bande de valence et le niveau E_F l'énergie de Fermi. Quand on met en contact le silicium de type *p* avec le silicium de type *n*, le niveau de Fermi s'aligne dans les deux parties pour être constant à travers tout le semi-conducteur, et les niveaux E_c et E_v se courbent pour être continus à travers la jonction. La région où les niveaux E_c et E_v ne sont pas horizontaux correspond à la région de charge d'espace; la courbure des bandes correspond à un gradient de potentiel (E_c/q ou E_v/q), donc à un champ électrique dirigé dans le sens contraire de la pente. Le nombre d'ions P^+ dans la partie gauche

(*n*) de la région de charge d'espace doit être égal au nombre d'ions B^- dans la partie droite puisque le semi-conducteur est globalement neutre. Si la densité d'impuretés phosphore du coté *n* est supérieure à la densité d'impuretés bore du côté *p*, la région de charge d'espace est plus étendue du côté *p* de sorte qu'en fin de compte il y ait autant de charges à gauche qu'à droite.

La jonction entre les deux zones de concentration en accepteurs et en donneurs ionisés N_A et N_D fait apparaître une barrière de potentiel V_B (built-in voltage), dont la valeur est donnée par l'équilibre de Boltzmann entre les deux régions:

$$n_i = N_D N_A \exp(-qV_B/kT), \qquad (5.18)$$

$$V_B = (kT/q)\mathrm{LOG}(N_A N_D/n_i^2). \qquad (5.19)$$

V_B est maximum quand le semi-conducteur est dégénéré; on a alors $V_B = E_g$.

La largeur w de la zone de charge d'espace est déterminée par les lois de l'électrostatique. Lorsque le passage entre les dopages N_A et N_D est abrupt, on obtient:

$$w = (2\epsilon V_B/q)^{1/2}(1/N_A + 1/N_D), \qquad (5.20)$$

où est la permittivité diélectrique relative du matériau.

5.11 Courant électrique dans une jonction p-n

5.11.1 Jonction non polarisée

La somme algébrique des courants qui traversent une jonction non polarisée est nulle. Néanmoins, à cause de l'inhomogénéité de la structure, il existe des courants

qui traversent la jonction dans les deux sens; on peut les classer suivant deux catégories:

1°) les courants dus aux porteurs minoritaires, appelés *courants de diffusion*; ils sont produits par les électrons du côté *p* qui peuvent atteindre le bord de la zone de charge d'espace, où ils sont entraînés vers le côté *n*; ils sont produits par les trous du côté *n* qui passent vers le côté *p*.

2°) les courants dus aux porteurs majoritaires, appelés *courant de conduction*; ils sont produits par les électrons du côté *n* qui ont, grâce à l'agitation thermique, une énergie suffisante pour traverser la zone de charge d'espace et remonter la barrière de potentiel V_B. La probabilité par unité de temps pour qu'un électron remonte cette barrière est proportionnelle à:

$$\exp(-qV_B/kT).$$

Définissons les densités de courant des porteurs majoritaires et des porteurs minoritaires comme suit:

J_1: courant des trous du côté *p* vers le côté *n*,
J_2: courant des électrons du côté *n* vers le côté *p*,
J_3: courant des trous du côté *n* vers le côté *p*,
J_4: courant des électrons du côté *p* vers le côté *n*.

Ces courants sont proportionnels aux concentrations des charges qui leur ont donné naissance, c'est-à-dire que:

$J_1 = k_1 p_p \exp(-qV_B/kT)$,
$J_2 = k_2 n_n \exp(-qV_B/kT)$,
$J_3 = k_3 p_n$,
$J_4 = k_4 n_p$.

k_1, k_2, k_3 et k_4 sont des constantes positives. Le courant total J (sens positif de *p* vers *n*) est donné par:

$$J = J_1 + J_2 - J_3 - J_4,$$

où

$$J = -k_3 p_n - k_4 n_p + (k_1 p_p + k_2 n_n)\exp(-qV_B/kT). \quad (5.21)$$

Dans la jonction non polarisée, les courants de diffusion et les courants de conduction s'égalisent, le courant total est nul:

$$k_3 p_n + k_4 n_p = (k_1 p_p + k_2 n_n)\exp(-qV_B/kT). \quad (5.22)$$

2.11.2 Jonction polarisée

Quand la jonction est polarisée en direct, c'est-à-dire quand on applique une tension V positive au côté *p* alors que le coté *n* est relié à la masse, le niveau de Fermi n'est plus le même des deux côtés de la jonction, il est plus élevé du côté *n*, ce qui indique que des électrons sont injectés de ce côté (Fig. 5.7a). La barrière de potentiel devient alors V_B - V. L'énergie nécessaire aux porteurs majoritaires pour traverser la jonction est plus faible que dans le cas de la jonction non polarisée; les courants J_1 et J_2 dus à ces porteurs deviennent plus importants tandis que les courants J_3 et J_4 dus aux porteurs minoritaires ne sont pratiquement pas modifiés. Le courant total est alors:

$$J= -k_3 p_n -k_4 n_p +(k_1 p_p +k_2 n_n)\exp(-q(V_B-V)/kT) \quad (5.23)$$

Quand on inverse la tension aux bornes de la jonction, la barrière de potentiel augmente (Fig. 5.7b) et les porteurs majoritaires ont besoin, pour traverser la jonction, d'une énergie d'autant plus grande que cette barrière est plus élevée. Leur contribution au courant total devient négligeable; on a alors:

$$J = - (k_3 p_n + k_4 n_p) = J_o, \quad (5.24)$$

où J_o est appelé *courant inverse* ou *courant de saturation.*

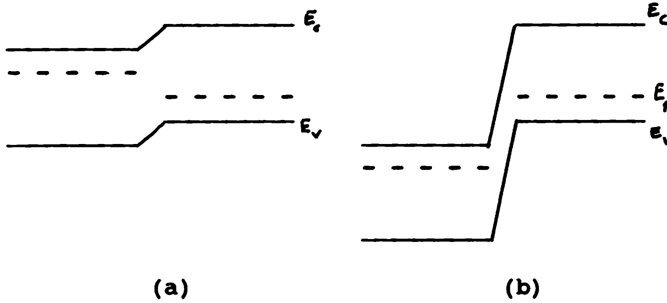


Fig. 5.7: Disposition des bandes énergétiques d'une diode polarisée en direct (*a*), et d'une diode polarisée en inverse (*b*).

En combinant les équations 5.22, 5.23 et 5.24, on obtient l'expression du courant total en fonction de la tension appliquée:

$$J = J_o\{\exp(- qV/kT) - 1\}. \qquad (5.25)$$

Le courant J_o est dominé par le courant de diffusion des porteurs minoritaires; il est proportionnel à la vitesse de diffusion des électrons et des trous, respectivement D_n/L_n et D_p/L_p:

$$J_o = \{(D_p/L_p)n_p + (D_n/L_n)p_n\}, \qquad (5.26)$$

où $L_p = D_p/\tau_p$ et $L_n = D_n/\tau_n$.

Sachant que $n_p p_p = n_i^2$; et puisqu'on peut supposer que toutes les impuretés acceptrices sont ionisables, on obtient alors:

$$n_p = n_i^2/N_A \quad \text{et} \quad p_n = n_i^2/N_D \qquad (5.27)$$

d'où:

$$J_o = qn_i^2\{D_n/(L_nN_A) + D_p/(L_pN_D)\}. \qquad (5.28)$$

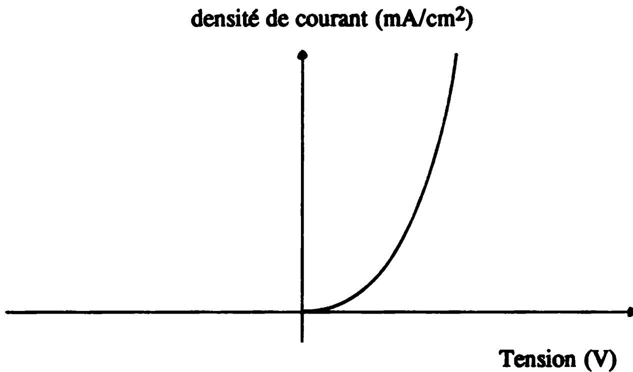


Fig. 5.8: Caractéristique courant-tension d'une jonction p-n.

2.12 La diode Schottky

Lorsqu'un métal est mis en contact avec un semi-conducteur, le niveau de Fermi des deux matériaux s'aligne. Trois cas sont possibles:

a) la position du niveau de Fermi du semi-conducteur par rapport aux niveaux d'énergie de conduction et de valence E_c et E_v est telle que l'alignement entre les deux niveaux de Fermi E_f ne donne lieu à aucune déformation des niveaux E_v et E_c (Fig. 5.9*a*). On dit que le contact est *ohmique*.

b) la position du niveau E_f dans le semi-conducteur par rapport à E_c et E_v est telle que lorsqu'il est mis en contact avec le métal les niveaux E_c et E_v se déforment en *montant* (Fig. 5.9*b*) pour permettre aux niveaux de Fermi des deux matériaux de s'aligner. On dit alors que le contact est *redresseur*. La structure obtenue est une diode dont le métal est l'anode.

c) la position du niveau E_f dans le semi-conducteur par rapport à E_c et E_v est telle que lorsqu'il est mis en contact avec le métal, les niveaux E_c et E_v se déforment en *descendant* (Fig. 5.9*c*) pour permettre aux niveaux de Fermi des deux matériaux de s'aligner. On dit alors que le contact est *redresseur*. La structure obtenue est une diode dont le métal est la cathode.

La diode métal-semi-conducteur obtenue dans les deux derniers cas s'appelle *diode Schottky*.

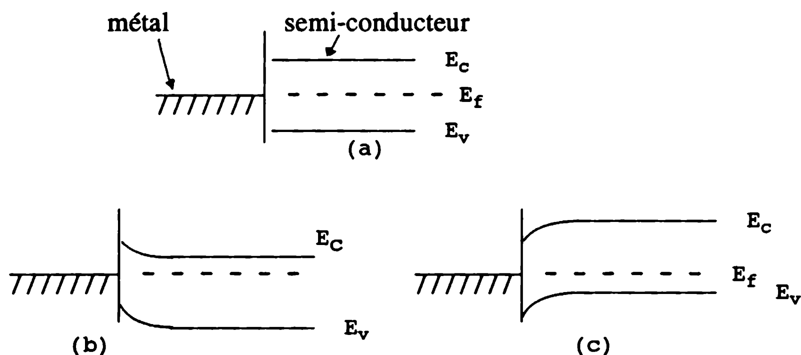


Fig. 5.9: Bandes énergétiques d'une jonction métal/semi-conducteur. (*a*): Contact ohmique, le courant passe aussi bien de gauche à droite que de droite à gauche. (*b*) et (*c*): Contact redresseur. Dans les deux derniers cas, la jonction est appelée diode Schottky.

TABLEAU 5.1
Propriétés de quelques semi-conducteurs.

Substance	E_g (eV)	μ_n (cm^2/Vs)	μ_n (cm^2/Vs)
Eléments simples			
Si	1.12	1900	500
Ge	0.85	3800	1820
aSn	0.09	2500	2400
Te	0.33	1100	500
Composés III-V			
AlAs	2.2	1200	420
AlSb	1.6	200	500
GaP	2.24	300	150
GaAs	1.43	9000	500
GaSb	0.67	5000	1400
InP	1.27	5000	200
InAs	0.36	33000	460
InSb	0.18	78000	750
Composés II-VI			
ZnO	3.2	180	
ZnS	3.54	180	5(400°C)
ZnTe	2.26	340	100
CdS	2.42	400	
CdSe	1.74	650	
CdTe	1.47	1200	50
HgTe	0.15	25000	350

EXERCICES

5.1 Un échantillon de silicium est dopé à 10^{16} atomes de phosphore par cm^3.
a) Déterminer la concentration N_D des donneurs.
b) Déterminer la concentration N_A des accepteurs.
c) Déterminer la concentration n des électrons.
d) Déterminer la concentration p des trous.

5.2 Un échantillon de silicium est dopé à 3.10^{16} atomes de bore par cm^3.
a) Déterminer la concentration N_A des accepteurs.
b) Déterminer la concentration N_D des donneurs.
c) Déterminer la concentration p des trous.
d) Déterminer la concentration n des électrons.

5.3 Un échantillon de silicium est dopé à l'arsénic, avec une concentration de 2.10^{16} atomes par cm^3, et au bore avec une concentration de 6.10^{16} atomes par cm^3.
a) Déterminer la concentration N_A des accepteurs.
b) Déterminer la concentration N_D des donneurs.
c) Déterminer la concentration p des trous.
d) Déterminer la concentration n des électrons.
e) Sachant que $\mu_n = 1000\ cm^2/V.s$ et que $\mu_p = 400\ cm^2/V.s$, calculer la conductivité σ et la résistivité ρ.
f) On soumet l'échantillon à un champ électrique $E = 4\ V/m$. Calculer le courant de conduction qui le traverse.

5.4 Un échantillon de silicium de type n est dopé avec une concentration de 10^{14} donneurs/cm^3. On diffuse des atomes accepteurs dans une région de cet échantillon. Si la résistivité de la région p obtenue est de 2,5 Ω-cm, calculer la concentration des accepteurs dans la région p et la concentration totales des impuretés dans cette région.

BIBLIOGRAPHIE

P. Robert, *Matériaux de l'électrotechnique*, Presses Polytechniques Romandes, édition Dunod, Paris, 1987.

A. Faussurier et R Servant, *Les matériaux électrotechniques*, Dunod, Paris, 1971

Th. Wildi, *Electrotechnique,* Les Presses de l'Université de Laval, Quebec, Canada, 1978.

J. Swiss, **Insulation (electric)**, pp. 774-801, *Encyclopedia of Chemical Technology*, vol. 11, 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc.

E.A. Nesbitt, **Magnetic Materials**, pp. 737-772, *Encyclopedia of Chemical Technology*, vol. 12, 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc.

R. Bonnefille (dircteur du traité), *Techniques de l'ingénieur*, vol. **D2**, **"Matériaux"**, (Cette édition est remise à jour régulièrement et le volume D2 contient plusieurs articles détaillés concernant les différents matériaux cités dans ce manuel).

Revue générale de l'électricité, revue mensuelle.

Daniel D. Pollock, *Physical Properties of Materials for Engineers*, CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, USA, (3 volumes), 1982.

A. Bianciotto et P. Boye, *La construction normalisée en électrotechnique*, tome 1, Ed. AFNOR et Delagrave, Paris, France, 1985.

Pierre Margrain, *Aide-mémoie d'électrotechnique appliquée*, Dunod, Paris, France, 1979.

Voir aussi:

S. Kalashnikov, *Electricité*, Editions MIR, Moscou, version française 1980.

R.G. Guévorkian, V.V. Chepel, *Cours de Physique générale*, Edition "Ecole Supérieure", Moscou, 2e édition, 1967.

D. Halliday, R. Resnick, *Physics, part II*, John Wiley and Sons, Inc. 3rd Edition, 1968.

INDEX